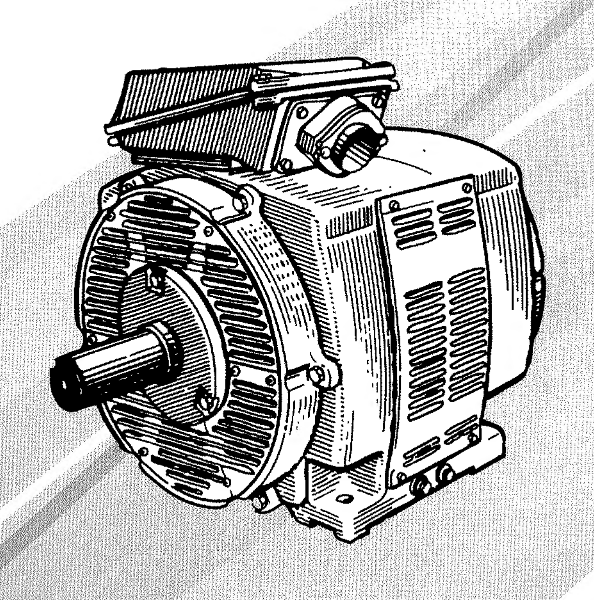
В. Н. Полузадов, Е. А. Дружинина

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Проектирование асинхронных двигателей общего назначения и взрывозащищенных исполнений



Екатеринбург – 2010

УДК 621.313
П53

Рецензенты:

Ануфриев В. П., профессор кафедры «Энергосбережение» Уральского государственного технического университета (УГТУ — УПИ), д-р эконом. наук, директор ООО «Уральский центр энергосбережения и экологии»;

Макаров В. А., генеральный директор Центра диагностики и экспертизы, канд. техн. наук.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета
Уральского государственного горного университета

Полузадов В. Н., Дружинина Е. А.

П53 Электрические машины. Проектирование асинхронных двигателей общего назначения и взрывозащищенных исполнений: учебное пособие / В. Н. Полузадов, Е. А. Дружинина; Урал. гос. горный ун-т.— Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010.— 381 с.

ISBN 978-5-8019-0229-6

Приведены алгоритмы электромагнитных расчетов асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором общего назначения и взрывозащищенных исполнений, позволяющие студентам без больших затрат времени самостоятельно создавать компьютерные программы при курсовом проектировании асинхронных двигателей.

Изложены принципы конструирования асинхронных двигателей общего назначения и взрывозащищенных исполнений по полученным расчетным данным.

Для студентов специальности 140604 – «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» (ЭГП).

Рис. 77. Табл. 45. Приложений 4. Библиогр. 8 назв.

УДК 621.313

ISBN 978-5-8019-0229-6

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в организации учебного процесса все большее предпочтение отдается самостоятельной работе студентов при сокращении часов аудиторных занятий.

В связи с реорганизацией учебного процесса возиикла необходимость адаптации учебной и методической литературы к реалиям времени. В предлагаемом учебном пособии предпринята попытка разработки адаптированного к современным требованиям методического продукта, при создании которого в качестве базовой монографии выбран учебник «Проектироваиие электрических машин», иаписанный коллективом кафедры электромеханики Московского института (МЭИ — ТУ) и завоевавший большую известность у нас в стране. Отличительной особениостью предложенной методики является расчет рабочих характеристик асинхрониого двигателя по Т-образной электрической схеме замещения, что позволило проектировать двигатели для частотно-регулируемого электропривода.

Для освоеиия студентами методики расчета по точиой Г-образной схеме замещения асинхронного двигателя расчет пусковых характеристик двигателя производится по этой методике.

При расчете пусковых характеристик учтен тот факт, что двигатели могут проектироваться на различные значения частот сети.

В связи с тем, что в горной промышленности на предприятиях опасных по газу и (или) горючей пыли используется взрывозащищенное оборудование, в методическом пособии рассмотрены особенности расчета и конструироваиия взрывозащищенных асиихронных двигателей.

С целью сокращения времени на выполнение курсового проекта при сохраиении основиого требования курсового проектирования — углубленного изучения физических процессов, протекающих в электрической машине, взаимосвязей между ее параметрами и характеристиками и оптимизации по заданным критериям качества, в методическом пособии приведен полный алгоритм решения задачи.

Алгоритм представлен в виде девяти фрагментов (количество разделов курсового проекта). В пределах каждого фрагмента материал разделен на кванты, которые оформлены в виде информационных окон. При разработке алгоритма особое внимание уделено «опорным точкам», в которых производится оценка допустимости отклонений промежуточных результатов расчета от их рациоиальных значений и даются рекомендации по коррекции расчета в нужных направлениях.

Представление алгоритма расчета асинхронного двигателя в таком виде позволяет студенту самостоятельио без большой затраты времени создавать компьютерные программы в пределах каждого фрагмента и проектировать асинхронный двигатель с применением ЭВМ.

Учебное пособие не может содержать все данные, необходимые для расчета и конструирования асинхронного двигателя, поэтому предполагается, что студенты при выполнении курсового проекта будут пользоваться справочниками, каталогами и атласами чертежей.

Краткая характеристика проектируемых асинхронных двигателей

Рассчитывается трехфазный асиихронный двигатель с короткозамкнутым ротором мощностью до 100 кВт, общего или взрывозащищенного исполнений.

Номинальные данные разрабатываемого асинхронного двигателя должны соответствовать продолжительному номинальному режиму работы ($S1$), который характеризуется продолжительностью работы, достаточиой для достижения установившейся температуры всех частей двигателя при неизмениой внешней нагрузке.

Обозначение степеней защиты электрических машин состоит из букв IP (International Protection) и следующих за иими цифр. Например, IP23 — двигатель, защищенный от попадаиия твердых тел размером более 12 мм и дождя под углом не более 60° к вертикали. IP44 — двигатель, защищенный от попадания твердых тел размером более 1мм и от водяных брызг любого направления.

Взрывозащищенные двигатели выпускаются со степенью защиты от внешних воздействий IP54. Это означает, что проникновение пыли во внутрь оболочки не предотвращено полностью. Однако пыль не может проникать в количестве, достаточном для нарушения работы машины. Также двигатель защищен от водяных брызг любого направления.

Обозначение способов охлаждения электрических машин состоит из букв IC (International Cooling) и следующих за ними цифр. Например, IC01 — защищенный двигатель с самовеитиляцией, причем веитилятор расположеи иа валу машины. Двигатели со степенью защиты IP23 и способом охлаждения IC01 имеют двусторонию симметричиую радиальную систему вентиляции. Роль центробежных вентиляторов выполняют лопатки ротора. IC0141 — закрытый двигатель, обдуваемый наружным вентилятором, расположенным на валу машины.

Обозначение формы исполнения электрических машин по способу монтажа состоит из букв IM (International Mounting) и следующих за ними цифр. Наиболее распространенным является исполнение IM1001 — двигатель с двумя подшипниковыми щитами на лапах, с одним горизонтально направленным цилиндрическим концом вала.

Конструкция и исполнение электрических машин должны предусматривать способность противостоять в условиях эксплуатации воздействию климатических факторов (температуры, влажности, пыли, солнечной радиации, интенсивности дождя и т. п.). Каждому климатическому исполнеиию электрических машин присвоено буквениое обозначение: У — для районов с умерениым климатом, ХЛ — с холодным климатом и т. д. За буквенным обозначением следует цифровое, характеризующее категорию размещения. Например, УЗ — для районов с умерениым климатом, для работы в закрытых помещеииях с естествеиной вентиляцией без искусствеиио регулируемых климатических условий. Взрывозащищениость двигателей обеспечивается видом взрывозащиты «Взрывонепроницаемая оболочка».

Структура компьютерной учебной программы «Проектирование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором»

Компьютерная учебная программа состоит из девяти взаимосвязанных фрагментов:

1. Выбор главных размеров асинхронного двигателя.
2. Расчет и оптимизация размеров зубцовой зоны статора и конструирование обмотки статора.
3. Выбор воздушного зазора, расчет и оптимизация размеров зубцовой зоны ротора.
4. Расчет магнитной цепи.
5. Расчет и оптимизация параметров асинхронного двигателя для номинального режима.
6. Расчет потерь в асинхронном двигателе.
7. Расчет и оптимизация рабочих характеристик.
8. Расчет и оптимизация пусковых характеристик.
9. Тепловой и вентиляционный расчеты асинхронного двигателя.

Каждому фрагменту присвоено имя, и создан каталог, обращаясь к которому, пользователь может вызвать любой фрагмент. Использование каждого последующего фрагмента возможно только при наличии у пользователя расчетных данных предыдущих фрагментов программы.

В пределах каждого фрагмента программный материал разделен на кванты, и эти кванты материала оформлены в виде информационных окон, выводящихся на экран нажатием клавиши мыши. Такой принцип построения учебной программы позволяет пользователю возвращаться в нужное информационное окно в пределах фрагмента программы, с целью коррекции расчета.

Методические указания к выполнению курсового проекта

Целью выполнения курсового проекта по дисциплине «Электрические машины» является закрепление теоретических положений дисциплины и формирование у студентов практических навыков и приемов расчета конкретных электрических машин.

Курсовой проект заключается в расчете и конструировании асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором общего назначения или взрывозащищенных исполнений. Выбор темы проектирования объясняется тем, что в настоящее время асинхронные двигатели являются основными преобразователями электрической энергии в механическую и составляют основу электропривода большинства горных машин и механизмов.

При курсовом проектировании каждый студент получает на кафедре индивидуальное задание на расчет и конструирование конкретного асинхронного двигателя. Полученное техническое задание обязательно приводится на первой странице пояснительной записки.

Техническое задание включает следующие данные.

1. Тип двигателя	Асинхроиный с короткозамкнутым ротором, обмотка ротора «беличья клетка» (заливка алюминием)
2. Назначение	Общего исполнения или взрывозащищеный
3. Номинальный режнм работы	$S1$
4. Номинальная мощность	$P_{2н}$=... кВт
5. Номинальное напряжение	Y/Δ,... В
6. Число полюсов	$2p$ = ...
7. Базисная частота	$f_{1н}$=... Гц
8. Частоты сети, при которых рассчитываются рабочие характеристики двигателя	f_1=... Гц
9. Закон изменения напряжения или ЭДС статора в завнсимости от частоты	$U_1/U_{1н}$=... $E_1/E_{1н}$=...

10. Степень защиты от воздействия окружающей среды	*IP...*
11. Способ охлаждения	*IC...*
12. Исполнение по способу монтажа	*IM...*
13. Климатические условия	....
14. Класс нагревостойкости изоляции	*F*
15. Маркировка взрывозащиты	......

Также в задании приведены основные требования к проектируемому двигателю:

– значение КПД и коэффициента мощности в номинальном режиме должны быть не хуже, чем у аналогичных серийных двигателей;

– значения перегрузочной способности и кратности начального пускового момента и значение кратности начального пускового тока должны соответствовать требованиям задания.

Курсовой проект содержит следующие разделы:

1. Выбор главных размеров асинхронного двигателя.

2. Выбор типа обмотки статора. Расчет, составление расчетной схемы-таблицы укладки обмотки в пазы и чертежа схемы обмотки.

3. Расчет размеров зубцовой зоны статора.

4. Выбор воздушного зазора. Расчет короткозамкнутого ротора.

5. Расчет магнитной цепи асинхронного двигателя.

6. Расчет параметров асинхронного двигателя для номинального режима.

7. Расчет потерь и КПД асинхронного двигателя.

8. Расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя.

9. Физическая суть явлений вытеснения тока и насыщения в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором и использование этих явлений для улучшения пусковых свойств двигателя. Расчет пусковых характеристик асинхронного двигателя.

10. Тепловой и вентиляционный расчеты асинхронного двигателя.

11. Составление таблицы сравнения основных размеров, параметров, рабочих и пусковых характеристик расчетного двигателя с основ-

ными размерами, параметрами, рабочими и пусковыми характеристиками однотипного серийного двигателя. Выводы по таблице сравнения.

12. Обоснование и описание конструкции рассчитанного асинхронного двигателя: установочно-присоединительные размеры, сердечник и обмотка статора, сердечник и обмотка ротора, станина, подшипниковые щиты, подшипниковые узлы, выводное устройство; узлы взрывозащиты; вентиляционная система.

13. Оформление пояснительной записки и выполнение графической части проекта. Графическая часть включает: продольный и поперечный разрезы двигателя, паз и зубец статора, паз и зубец ротора, катушку обмотки статора, если обмотка двухслойная или катушечную группу, если обмотка однослойная; спецификацию основных частей двигателя, спецификацию корпусной изоляции обмотки статора и выполняется на одном листе формата 841×594 мм в карандаше в соответствии с правилами Единой системы конструкторской документации (ЕСКД).

Расчетная часть проекта оформляется в виде пояснительной записки на листах стандартного формата 210×297 мм. Необходимые графики, рисунки и схемы выполняются на листах миллиметровой бумаги формата 210×297 или 420×297 мм. Минимально необходимый набор рисунков включает условную схему фазы А обмотки, полную схему обмотки (каждая фазная обмотка вычерчивается своим цветом), пазы статора и ротора, расчетную схему магнитной цепи, схемы замещения двигателя при расчете рабочих и пусковых характеристик, рабочие и пусковые характеристики двигателя и механическую характеристику.

Титульный лист записки выполняется по форме (рис. 0.1).

За титульным листом вставляется пустой лист с заголовком «Рецензия».

Текст записки располагается по указанной форме (табл. 0.1).

Цифровая подстановка в уравнения дается один раз без промежуточных сокращений и расчетов. Численное значение символа должно в формуле занимать то же место, что и сам символ.

Федеральное агентство по образованию

ГОУ ВПО

«Уральский государственный горный университет»

Кафедра электротехники

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ (ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО ИСПОЛНЕНИЯ) МОЩНОСТЬЮ 15 кВт, ЧИСЛОМ ПОЛЮСОВ $2p$=4, СТЕПЕНЬЮ ЗАЩИТЫ IP44

Пояснительная записка к курсовому проекту
по дисциплине «Электрические машины»

Разработчик
студент группы ЭГП-95-1 — И. И. Иванов

Руководитель проекта
профессор — А. П. Петров

Екатеринбург, 2010

Рис. 0.1. Титульный лист

Таблица 0.1

Оформление текста пояснительной записки

№ п/п	Наименование расчетных величин, формулы и пояснения	Обозначение	Величина	Размерность
5.	Расчетная мощность $P'=P_2\frac{k_E}{\eta\cdot\cos\varphi}=15\cdot10^3\frac{0,97}{0,89\cdot0,88}=18578\,\text{В}\cdot\text{А}$ где k_E – рис. 6–8, с. 164, [1], η, $\cos\varphi$ – рис. 6–9, *а*, с. 165, [1]	P'	18578	В·А

Расчеты сопровождаются поясненнями технической и экономической целесообразности выбираемых параметров. Для варьируемых величин указываются рекомендуемые пределы со ссылкой на литературу.

При выполнении расчета рабочих характеристик приводится подробный расчет для скольжеиия $S_{\text{н пред}} = r'_{2*}$. Для остальных зиачений скольжений данные расчета представляются в табличной форме. Рабочие характеристики рассчитываются для диапазона скольжений $0{,}2S_{\text{н.пред}}$ — $1{,}2S_{\text{н.пред}}$ с шагом приращения скольжения $T = 0{,}2S_{\text{н.пред}}$. Данные номинального режима ($P_2 = P_{2\text{н}}$) могут быть рассчитаны аналитически или определены из графиков рабочих характеристик.

При выполнении расчета пусковых характеристик приводится подробный расчет для скольжения $S = 1$. Для остальных значений скольжений (0,8; 0,6; 0,4; 0,2; $S_{\text{кр пред}}$; $S_{\text{кр}}$; $0{,}6S_{\text{кр}}$; $0{,}4S_{\text{кр}}$) данные расчета представляются в табличной форме. Определеиие точного значения критического скольжения $S_{\text{кр}}$ детально объясняется.

При составлении таблицы сравнения данные аналогичного серийного двигателя берут из киигн [2]:

а) для степени защиты IP44: табл. 2.1, с. *27–31*; табл. 3.1, с. *66–70*; табл. 6.1, с. *181–183* и с. *184–247*;

б) для степени защиты IP23: табл. 2.2, с. *32–34*; табл. 3.2, с. *71–73*, табл. 6.2, с. *181–183* и с. *248–285*.

При обосновании конструкции двигателя (раздел 12), кроме основных конструктивных узлов, необходимо выбрать стандартные размеры свободного конца вала (вал проверить на наибольший момент вращения), подшипники качения, количество и размеры вентиляционных лопаток ротора, а для двигателя со степенью защиты IP44, IP54 дополнительно – количество и размеры продольных ребер станины и центробежный вентилятор. Необходимые сведения можно найти в книге [8].

Основным материалом для разработки конструкции двигателя являются заводские чертежи и данные ГОСТов, справочников и каталогов.

Конструктивная компоновка двигателя начинается с вычерчивания активиой части машины по размерам, полученным в результате расчета.

Затем вычерчивается лобовая часть обмотки статора и подшипниковые щиты. Зазоры между лобовой частью и подшипниковыми щитами выбираются примерно такими же, как у серийных одиотипных машин.

1. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НА ЭВМ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

(первый фрагмент программы)

Расчет асинхронного двигателя начинают с определения главных размеров: внутреннего диаметра магнитопровода статора D и расчетной длины воздушного зазора l_δ. Произведение квадрата внутреннего диаметра на расчетную длину воздушного зазора, характеризующее объем электромагнитного ядра машины, является функцией следующих параметров:

$$D^2 \cdot l_\delta = f(P', \Omega, k_в, k_{об1}, A, B_\delta),$$

где P' — расчетная мощность;

Ω — угловая скорость вращения магнитного поля в воздушном зазоре;

$k_в$ — коэффициент формы магнитного поля;

$k_{об1}$ — обмоточный коэффициент обмотки статора;

A — линейная нагрузка;

B_δ — индукция в воздушном зазоре.

На первом этапе расчета все параметры, кроме угловой скорости вращения магнитного поля, неизвестны. Поэтому пользователь вводит в расчет предварительные значения этих параметров, которые он выбирает по таблицам и графикам, составленным на основании статистической обработки накоплеиных опытных данных.

Расчет асинхронного двигателя начинается с ввода исходных данных (данных технического задания).

Информационное окно № 1.1
Расчет главных размеров асинхронного двигателя. Ввод исходных данных

Число, месяц, год	...?
Ваши фамилия, инициалы	...?
Группа	...?
Руководитель, должность, звание, фамилия, инициалы	...?

Введите данные технического задания на проектирование асинхронного двигателя:

1. Тип двигателя	Асинхронный с короткозамкнутым ротором, обмотка ротора «беличья клетка» (заливка алюминием)
2. Назначение	Общего исполнения или взрывозащищениый
3. Номинальный режим работы	*S*1
4. Номинальиая мощиость	$P_{2н}$=... кВт
5. Номинальное напряжение	Y/Δ,... В
6. Число полюсов	$2p$ = ...
7. Базисиая частота	$f_{1н}$=... Гц
8. Частоты сети, при которых рассчитываются рабочие характеристики двигателя	f_1=... Гц
9. Закон изменения напряжения или ЭДС статора в зависимости от частоты	$U_1/U_{1н}$=... $E_1/E_{1н}$=...
10. Степень защиты от воздействия окружающей среды	*IP*...
11. Способ охлаждения	*IC*...
12. Исполиение по способу монтажа	*IM*...
13. Климатические условия	....
14. Класс нагревостойкости изоляции	*F*
15. Маркировка взрывозащиты	......

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 1.1. Нет — информ. окно № 1.2?).

Информационное окно № 1.2
Предварительное значение высоты оси вращения двигателя

Введите предварительное значение высоты оси вращения проектируемого двигателя.

Необходимая для принятия решения информация:

— номинальная мощность

$$P_{2н} = \ldots \text{ кВт};$$

— число полюсов

$$2p = \ldots;$$

— степень защиты

$$\text{IP} = \ldots$$

Высоту вращения определить:

степень защиты IP44, IP54 — (рис. 1.1, *а*)

степень защиты IP23 — (рис. 1.1, *б*)

Полученное значение округлить до ближайшего стандартного из следующего ряда: 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250 мм.

Предварительная высота оси вращения

$$h_{пред} = \ldots? \text{ мм}$$

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 1.2. Нет — информ. окно № 1.3?).

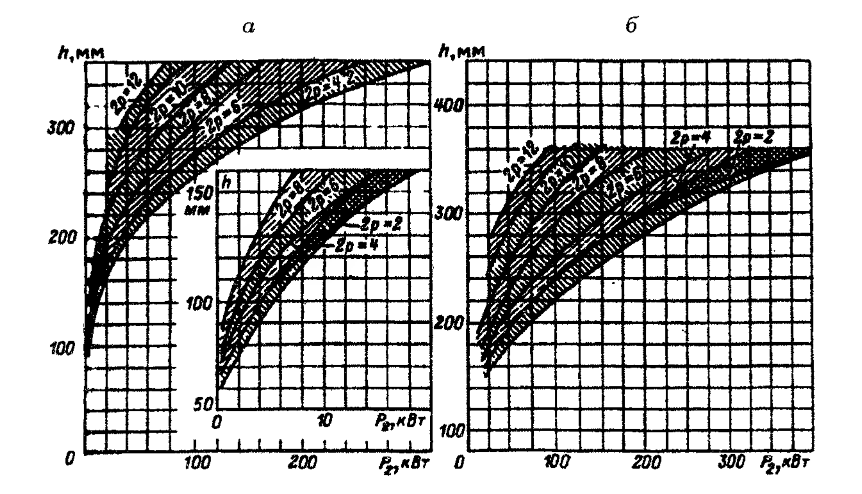


Рис. 1.1. Высота оси вращения h двигателей различной мощности и частоты вращения:

а – степень защиты IP44, IP54; *б* – степень защиты IP23

Информационное окно № 1.3
Предварительное значение наружного диаметра магнитопровода статора

Введите предварительное значение наружного диаметра магнитопровода статора.

Необходимая для принятия решения информация:

– предварительная высота оси вращения

$h_{пред}$ =... мм.

Наружный диаметр определить по табл. 1.1.

$D_{a.пред}$ =...? м

Таблица 1.1

Высоты оси вращения электрических машин и соответствующие им наружные диаметры статоров асинхронных двигателей

h, мм	56	63	71	80	90	100	112	132
D_a, м	0,089	0,100	0,116	0,131	0,149	0,168	0,191	0,225
h, мм	160	180	200	225	250	280	315	355
D_a, м	0,272	0,313	0,349	0,392	0,437	0,530	0,590	0,660

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 1.3. Нет — информ. окно № 1.4?).

Информационное окно № 1.4
Коэффициент K_E

Введите значение коэффициента, характеризующего отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению.

Необходимая для принятия решения информация:

— число полюсов $2p = \ldots$;

— предварительное значение наружного диаметра $D_{a.\text{пред}} = \ldots$ м.

Значение коэффициента определить по рис.1.2.

$K_E = \ldots?$

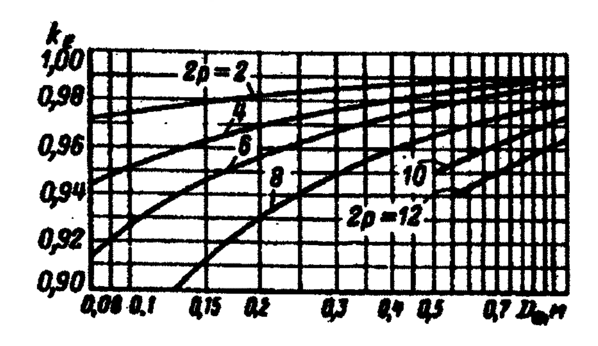


Рис. 1.2. Значение коэффициента K_E

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 1.4. Нет — информ. окно № 1.5?).

Информационное окно № 1.5
Коэффициент K_D

Введите значение коэффициента, характеризующего отношение внутреннего диаметра статора к наружному.

Необходимая для принятия решения информация:

— число полюсов $2p = \ldots$.

Значение коэффициента определить по табл. 1.2.

$$K_D = \ldots ?$$

Таблица 1.2

Отношение $K_D = D/D_a$ в двигателях при различных числах полюсов

$2p$	2	4	6	8—12
K_D	0,52—0,57	0,64—0,68	0,70—0,72	0,74—0,77

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 1.5. Нет — информ. окно № 1.6?).

Информационное окно № 1.6
Предварительные значения номинальных КПД и коэффициента мощности

Введите предварительные значения номинальных КПД и коэффициента мощности.

Необходимая для принятия решения информация:

— иоминальная мощность

$$P_{2н} = \ldots \text{ кВт;}$$

— число полюсов

$$2p = \ldots;$$

— степень защиты

$$IP = \ldots$$

— значения КПД и cos φ необходимо вводить в относительных единицах.

Предварительное значение номинального КПД определить:

степень защиты IP44, IP54 мощность до 30 кВт (рис. 1.3, *а*);

степень защиты IP44, IP54 мощность от 30 до 300 кВт (рис. 1.3, *б*);

степень защиты IP23 (рис. 1.3, *в*).

$\eta_{н.пред.}$=...? о. е.

Предварительное значение номинального коэффициента мощности определить:

степень защиты IP44, IP54 мощность до 30 кВт (рис. 1.4, *а*);

степень защиты IP44, IP54 мощность от 30 до 300 кВт (рис. 1.4, *б*);

степень защиты IP23 (рис. 1.4, *в*).

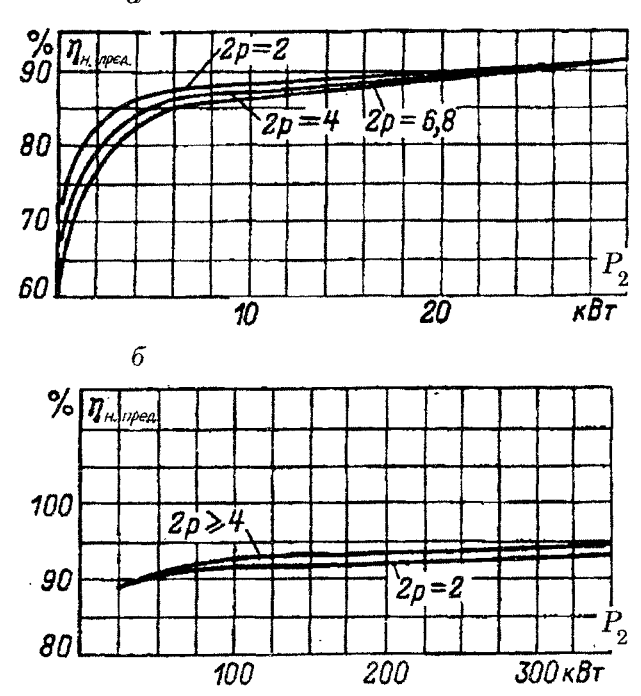
cos $\varphi_{н\ пред}$= ...? о. е.

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 1.6. Нет — информ. окно № 1.7?).

Информационное окно № 1.7 *Предварительные значения электромагнитных нагрузок*

Предварительные значения электромагнитных нагрузок для двигателей общепромышленного исполнения определяют по рис. 1.5 и 1.6.

Для взрывозащищенных двигателей предварительное значеиие индукции в воздушном зазоре уменьшают на 3—5 %, а линейную нагрузку — на 7—12 % по сравнению с аналогичиыми двигателями общепромышленного исполнения с степенями защиты IP44, IP54.



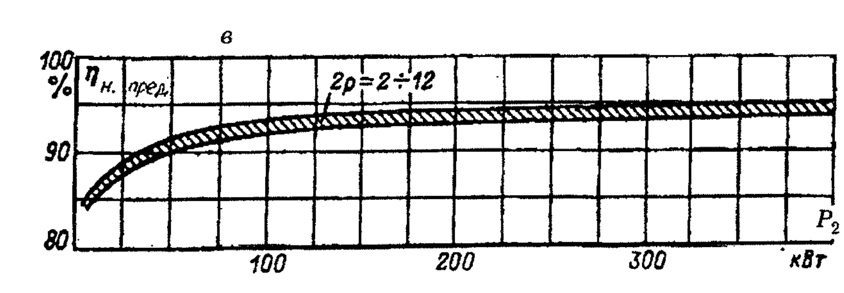


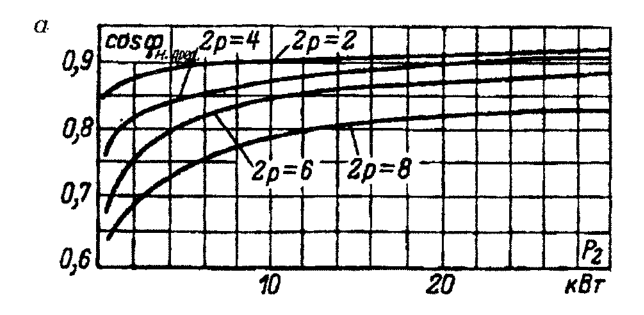
Рис. 1.3. Примерные значения КПД асинхронных двигателей:

а — мощностью до 30 кВт и степенью защиты IP44. IP54;

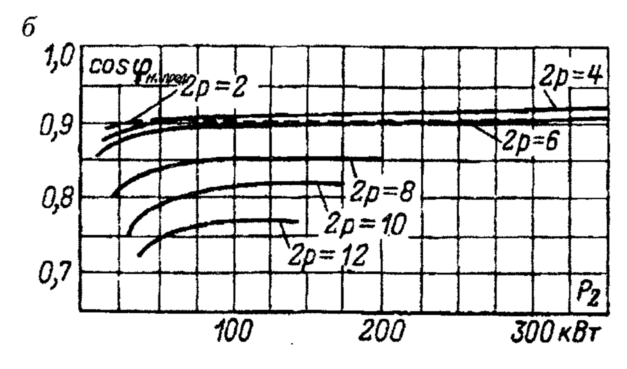
б — мощностью до 400 кВт и степенью защиты IP44, IP54;

в — со степенью защиты IP23

а



б



в

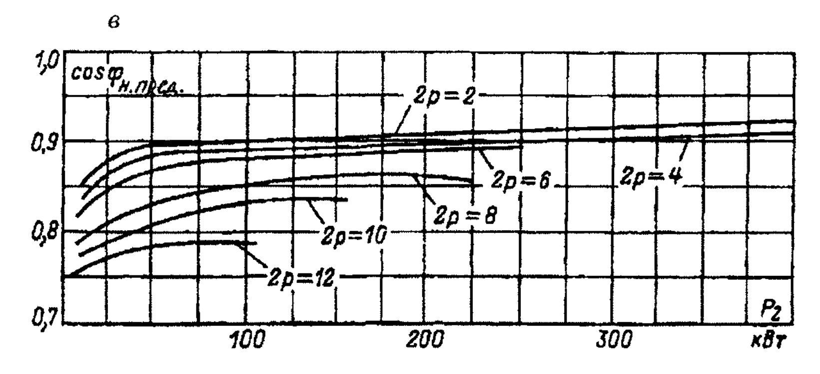


Рис. 1.4. Примерные значения cosφ асинхронных двигателей:

а — мощностью до 30 кВт и степенью защиты IP44, IP54;

б — мощностью до 400 кВт и степенью защиты IP44, IP54;

в — со степенью защиты IP23

Следовательно, для взрывозащищенных двигателей:

$$B_{\delta\,\text{пред}} = (0{,}97 - 0{,}95)\, B_{\delta\,\text{пред}}^{(\text{табл})};$$
$$A_{\text{пред}} = (0{,}93 - 0{,}88)\, A_{\text{пред}}^{(\text{табл})},$$

где $B_{\delta\,\text{пред}}^{(\text{табл})}$, $A_{\text{пред}}^{(\text{табл})}$ — предварительные значения индукции в воздуш-ном зазоре и линейной нагрузки, определенные по рис. 1.5 и 1.6 (необ-ходимо брать данные, соответствующие нижним границам допустимых значений).

Введите предварительные значения электромагнитных нагрузок.

Необходимая для принятия решения информация:

— общего назначения или взрывозащищенный;

— степень защиты

IP...,

— предварительное значение высоты оси вращения

$h_{\text{пред.}}=$... мм,

— число полюсов

$2p=$...,

— предварительное значение наружного диаметра $D_{a\,\text{пред.}}=$...м.

Предварительное значение индукции в воздушном зазоре опреде-лить:

степень защиты IP44, IP54 высота оси вращения $h \leqslant 132$ мм (рис. 1.5, *а*);

степень защиты IP44, IP54 высота оси вращения $h = 160$—250 мм (рис. 1.5, *б*);

степень защиты IP23, высота оси вращения $h = 160$—250 мм (рис. 1.5, *в*).

$B_{\delta.\text{пред.}}=$...? Тл

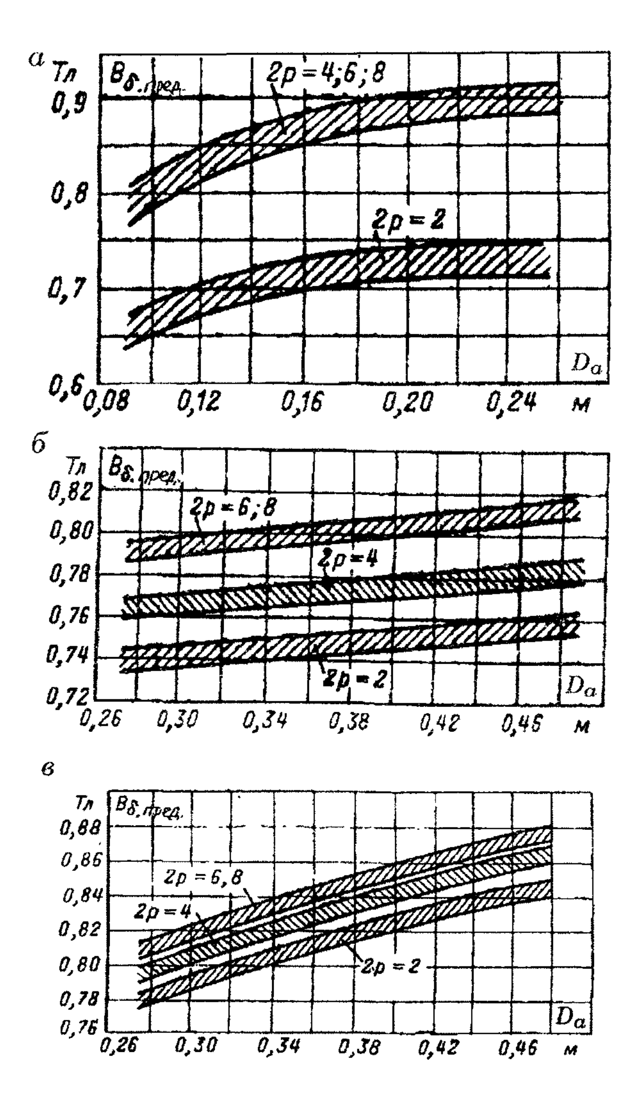


Рис. 1.5. Предварительные значения индукции в воздушиом зазоре асинхронных двигателей:

а – при высоте оси вращения $h \leqslant 132$ мм и степени защиты IP44, IP54; *б* – h =160–250 мм и степени защиты IP44, IP54; *в* – h =160–250 мм и степени защиты IP23

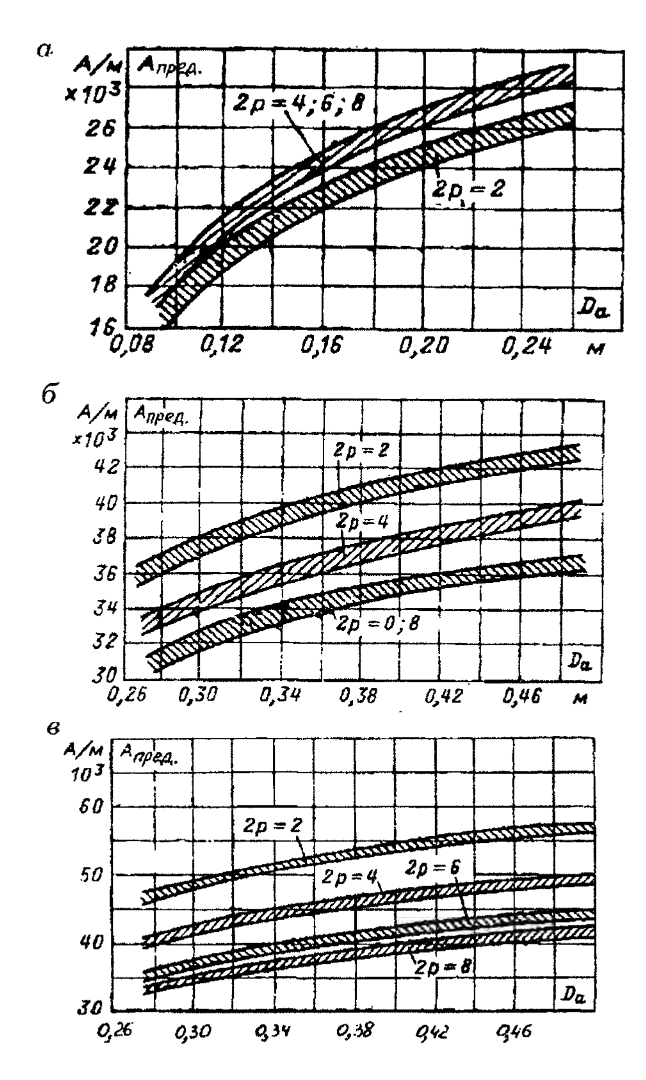


Рис. 1.6. Предварительные значения линейной иагрузки асинхронных двигателей:

а – при высоте оси вращения $h \leqslant 132$ мм и степени защиты IP44, IP54; *б* – h =160–250 мм и степени защиты IP44, IP54; *в* – h =160–250 мм и степени защиты IP23

Предварительное значение линейной нагрузки определить:

степень защиты IP44, IP54 высота оси вращения $h \leqslant 132$ мм (рис. 1.6, *а*);

степень защиты IP44, IP54 высота оси вращения h =160—250 мм (рис. 1.6, *б*);

степень защиты IP23, высота оси вращения h =160—250 мм (рис. 1.6, *в*).

$A_{пред}$ =...? А/м

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 1.7. Нет — информ. окно № 1.8?).

Информационное окно № 1.8 Идентификатор обмотки статора и предварительное значение обмоточного коэффициента

Введите идентификатор обмотки статора и предварительное значение обмоточного коэффициента обмотки статора.

Необходимая для принятия решения информация:

— общего назначения или взрывозащищенный;

— предварительное значение высоты оси вращения

$$h_{пред.} =\dots \text{ мм};$$

— число полюсов

$$2p =\dots .$$

В асинхронных двигателях с высотой оси вращения $h \leqslant 160$ мм применяется однослойная обмотка, которой присваивается идентификатор 1 (исключение $2p$=2, h=160).

Для однослойных обмоток предварительное значение обмоточного коэффициента

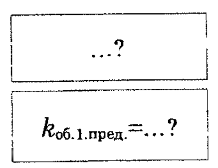
$$k_{об.1.пред.} = 0{,}95\text{—}0{,}96.$$

При высоте оси вращения $h > 160$ мм примеияется двухслойная обмотка, также эта обмотка применяется в двухполюсных двигателях при $h = 160$ мм. Двухслойиой обмотке присваивается идентификатор 2. Предварительное значение обмоточного коэффициеита двухслойной обмотки:

$$k_{\text{об.1.пред.}} = 0{,}80\text{—}0{,}81 \text{ при } 2p = 2;$$

$$k_{\text{об.1.пред.}} = 0{,}91\text{—}0{,}92 \text{ при } 2p > 2.$$

Идентификатор обмотки



Корректировка расчета (Да — информ. окно № 1.8. Нет — информ. окно № 1.9?).

Комментарий. Правильность выбора размеров асинхронного двигателя оценивается при помощи критерия правильиости выбора главных размеров λ. Асинхронные двигатели, у которых λ лежит в нижней части оптимальной зоны (см. рис. 1.7, а, б), характеризуются лучшими условиями охлаждения и облегченной технологией сборки и укладки обмотки статора в пазы. Асинхронные двигатели, у которых λ лежит в верхней части оптимальной зоны, характеризуются меньшим моментом инерции ротора, а также меньшим расходом меди на лобовые части обмотки статора.

Если значение коэффициента λ не укладывается в рекомендуемые пределы, то необходимо изменить главные размеры двигателя.

При выборе главных размеров рекомендуется рассчитать не менее трех вариантов при различных зиачениях высот оси вращения и внутренних диаметров статора.

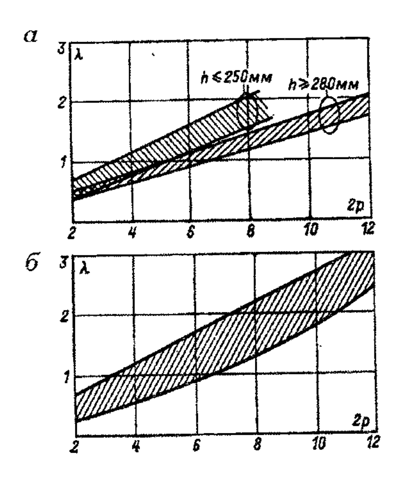


Рис. 1.7. Отношение $\lambda = l_\delta / \tau$ для двигателей:
а — степень защиты IP44, IP54; *б* — степень защиты IP23

Информационное окно № 1.9
Верхняя и нижняя границы критерия λ

Введите значения верхней и нижней границы критерия правильности выбора главных размеров.

Необходимая для принятия решения информация:

— степень защиты

IP...;

— число полюсов

$2p$=...;

— предварительное значение высоты оси вращения

$h_{пред.}$=...мм.

Значения верхней и нижней границ критерия определить:

степень защиты IP44, IP54 высота оси вращения $h \leq 250$ мм (рис. 1.7, а);

степень защиты IP23, высота оси вращения $h \leqslant 250$ мм (рис. 1.7, б).

$\lambda_{max}=\ldots?$

$\lambda_{min}=\ldots?$

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 1.9. Нет — формулы (1.1)—(1.7), информ. окно № 1.10?) .

При ответе «Нет» ЭВМ производит следующие вычисления (формулы (1.1)—(1.7)).

Предварительное значение внутреннего диаметра магнитопровода статора, м (точность расчета — три знака после запятой):

$$D_{\text{пред.}}=K_D \cdot D_{a\ \text{пред.}} \qquad (1.1)$$

Предварительное значение полюсного деления, м (точность расчета — три знака после запятой):

$$\tau_{\text{пред.}}=\pi \cdot D_{\text{пред}}/(2p). \qquad (1.2)$$

Расчетная мощность, кВ·А:

$$P'=(K_E \cdot P_{2\text{н}})/(\eta_{\text{н пред}} \cdot \cos\varphi_{\text{н.пред}}). \qquad (1.3)$$

Синхронная угловая скорость вращения (скорость вращения магнитного поля в воздушном зазоре), $с^{-1}$

$$\Omega=2\pi f_{1\text{н}}/p,$$

где p — число пар полюсов.

В ЭВМ эта формула вводится в следующем виде:

$$\Omega=4\pi f_{1\text{н}}/(2p), \qquad (1.4)$$

Предварительное значение расчетной длины воздушного зазора, м (точность расчета — три знака после запятой, причем третий знак округляется до пяти или до нуля в большую сторону).

$$l_{\delta\,\text{пред}} = \frac{P' \cdot 10^3}{1{,}11\, D^2_{\text{пред.}} \cdot \Omega \cdot k_{\text{об 1.пред}} \cdot A_{\text{пред}} \cdot B_{\delta\,\text{пред}}}. \qquad (1.5)$$

Для асинхроиных двигателей с $h \leqslant 250$ мм и длиной воздушного зазора $l_\delta \leqslant 300$мм радиальных вентиляционных каналов не делают, поэтому сердечники статора и ротора шихтуются каждый в один пакет ($l_\delta = l_{\text{ст1}} = l_{\text{ст2}}$).

Заготовительиая масса электротехнической стали для изготовления магнитопровода, кг

$$m_{\text{с}} = k_{\text{с}}\, \gamma_{\text{с}} (D_{a\,\text{пред}} + 0{,}01)^2\, l_{\delta\,\text{пред}},$$

где $k_{\text{с}} = 0{,}97$ — козффициент заполнения пакета сталью при толщине листа 0,5 мм и изоляции путем оксидирования;

$\gamma_{\text{с}} = 7{,}8 \cdot 10^3$ кг/м^3 – удельная масса стали.

В ЭВМ эта формула введена в виде

$$m_{\text{с}} = 7{,}566 \cdot 10^3 (D_{a.\,\text{пред}} + 0{,}01)^2\, l_{\delta\,\text{пред}}. \qquad (1.6)$$

Критерий правильности выбора главных размеров

$$\lambda = l_{\delta\,.\text{пред}} / \tau_{\text{пред.}}. \qquad (1.7)$$

Информационное окно № 1.10
Расчет главных размеров асинхронного двигателя закончен. Проверка введенных данных

Проверьте данные, введенные при расчете:

Число, месяц, год	...
Ваши фамилия, инициалы	...
Группа	...
Руководитель, должность, звание, фамилия, инициалы	...

1.Тип двигателя	Асинхронный с короткозамкнутым ротором, обмотка ротора «беличья клетка» (заливка алюмнннием)
2. Назначение	Общего исполнения или взрывозащищенный
3. Номинальный режим работы	$S1$
4. Номинальная мощность	$P_{2н}$=... кВт
5. Номинальное напряжеиие	Y/Δ,... В
6. Число полюсов	$2p$ = ...
7. Базисная частота	$f_{1н}$=... Гц
8. Частота сети, при которых рассчитываются рабочие характеристики двигателя	f_1=... Гц
9. Закон изменения напряжения или ЭДС статора в зависимости от частоты	$U_1/U_{1н}$=... $E_1/E_{1н}$=...
10. Степень защиты от воздействия окружающей среды	IP...
11. Способ охлаждения	IC...
12. Исполнение по способу монтажа	IM...
13. Климатические условия	....
14. Класс нагревостойкости изоляции	F
15. Маркировка взрывозащиты	......
16. Предварительная высота оси вращения	$h_{пред}$= ... мм
17. Предварительное значение наружного диаметра магнитопровода статора	$D_{a.пред.}$=... м
18. Коэффициент K_E	K_E=...
19. Коэффициент K_D	K_D =...
20. Предварительное значение номинального КПД	$\eta_{н.пред}$=...
21. Предварительное значение номинального коэффициента мощности	$\cos\varphi_{н.пред}$ =...
22. Предварительное значение индукции в воздушном зазоре	$B_{\delta\ пред}$=...Тл
23. Предварительное значение линейной нагрузки	$A_{пред}$=...А/м
24. Индентификатор обмотки статора	...
25. Предварительное значение обмоточного коэффициента	$k_{об\ 1.пред}$=...
26. Верхняя граница критерия λ	λ_{max}= ...
27. Нижняя граиица критерия λ	λ_{min}= ...

Просмотр введенных данных закончен.

Повторить — (Да — информ. окно № 1.10?).

Результаты расчета — (Да — информ. окно № 1.11?).

Информационное окно № 1.11
Результаты расчета главных размеров

$$D_{пред.} = \ldots \text{ м} \quad (1.1)$$

$$\tau_{пред.} = \ldots \text{ м} \quad (1.2)$$

$$P' = \ldots \text{ кВ·А} \quad (1.3)$$

$$\Omega = \ldots \text{ с}^{-1} \quad (1.4)$$

$$l_{\delta.пред} = \ldots \text{ м} \quad (1.5)$$

$$m_c = \ldots \text{ кг} \quad (1.6)$$

$$\lambda = \ldots \quad (1.7)$$

Если главные размеры выбраны правильно, то $\lambda_{min} \leqslant \lambda \leqslant \lambda_{max}$.

Просмотр закончен.

Повторить — (Да — информ. окно № 1.2?).

Печать: (Да — информ. окно № 1.10 и 1.11?).

Для оптимального выбора значений главных размеров рекомендуется рассчитать не менее трех вариантов при различных значениях высот оси вращения двигателя и внутренних диаметров магнитопровода статора.

Переход ко второму фрагменту программы.

2. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НА ЭВМ РАЗМЕРОВ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ СТАТОРА. КОНСТРУИРОВАНИЕ ОБМОТКИ СТАТОРА
(второй фрагмент программы)

Информационное окно № 2.1
Расчет размеров зубцовой зоны статора
Конструирование обмотки статора.
Ввод исходных данных

Число, месяц, год	...?
Ваши фамилия, инициалы	...?
Группа	...?
Руководитель, должность, звание, фамилия, инициалы	...?

Введите данные технического задания на проектирование асинхронного двигателя:

1. Тип двигателя	Асинхронный с короткозамкнутым ротором, обмотка ротора «беличья клетка» (заливка алюминием)
2. Назначение	Общего исполнения или взрывозащищенный
3. Номинальный режим работы	$S1$
4. Номинальная мощность	$P_{2н}$=... кВт
5. Номинальное напряжение	Y/Δ,... В
6. Число полюсов	$2p$ = ...
7. Базисная частота	$f_{1н}$=... Гц
8. Частоты сети, при которых рассчитываются рабочие характеристики двигателя	f_1=... Гц
9. Закон изменения напряжения или ЭДС статора в зависимости от частоты	$U_1/U_{1н}$=... $E_1/E_{1н}$=...

10. Степень защиты от воздействия окружающей среды	*IP...*
11. Способ охлаждения	*IC...*
12. Исполнение по способу монтажа	*IM...*
13. Климатические условия	....
14. Класс нагревостойкости изоляции	*F*
15. Маркировка взрывозащиты	......

Данные выбранного для дальнейшего расчета варианта главных размеров двигателя:

1. Высота оси вращения двигателя	h=...? мм
2. Наружный диаметр магнитопровода статора	D_a=...? м
3. Коэффициент K_E	K_E =...?
4. Предварительное значение номинального КПД	$\eta_{н\ пред}$ = ...? о.е.
5. Предварительное значение номинального коэффициента мощности	$\cos\varphi_{н\ пред}$ =...? о.е.
6. Предварительное значение индукции в воздушном зазоре	$B_{\delta\ пред}$ =...? Тл
7. Предварительное значение линейной нагрузки	$A_{пред}$ =...? А/м
8. Идентификатор обмотки статора	...?
9. Внутренний диаметр магнитопровода статора	D=...? м
10. Расчетная длина воздушного зазора	l_δ=...? м
11. Полюсное деление	τ =...? м

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 2.1. Нет — информ. окно № 2.2?).

Информационное окно № 2.2
Предварительное значение зубцового деления статора

Введите максимальное и минимальное значения зубцового деления статора.

Необходимая для принятия решения информация:

— обмотка статора всыпная;

— полюсное деление τ =...м;

— высота оси вращения h =... мм.

Предварительное значение зубцового деления определить по рис. 2.1:

— первая зона — двигатели с $h \leqslant 90$ мм;

— вторая зона — двигатели с $h \in [90, 250]$ мм.

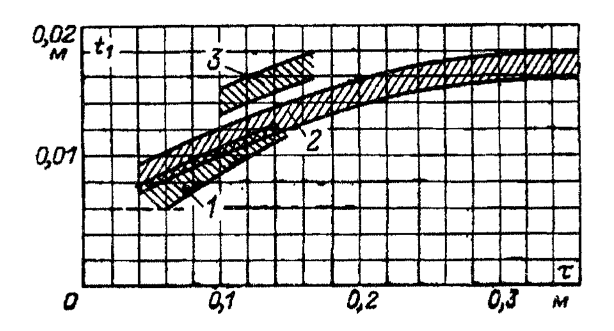


Рис. 2.1. Зубцовое деление статора асинхронных двигателей со всыпной обмоткой:

1 — двигатели с $h \leqslant 90$ мм; *2* — двигатели с $h \in [90, 250]$;

3 — двигатели с $h \geqslant 280$ мм

Предварительные максимальное и минимальное значения зубцовых делений статора:

$t_{1пред}^{max}$ =...? м

$t_{1пред}^{min}$ =...? м

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 2.2. Нет — формулы (2.1) и (2.2) информ. окно № 2.3?).

Предварительные минимальное и максимальное числа пазов статора:

$$Z_{1пред}^{min} = \pi D / t_{1пред}^{max}; \qquad (2.1)$$

$$Z_{1пред}^{max} = \pi D / t_{1пред}^{min}. \qquad (2.2)$$

Информационное окно № 2.3
Выбор чисел пазов статора и ротора

По табл. 2.1 выберите окончательные значения пазов статора и ротора.

Необходимая для принятия решения информация:

— число полюсов $2p$ =...;

— пазы без скоса;

— предварительные минимальное и максимальное значения чисел пазов статора

$$Z_{1пред}^{min} = \ldots;$$

$$Z_{1пред}^{max} = \ldots$$

В двигателях мощностью до 100 кВт рекомендуется выбирать $Z_1 > Z_2$.

Число пазов статора (табл. 2.1)

Z_1=...?

Число пазов ротора (см. табл. 2.1)

Z_2=...?

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 2.3. Нет — формулы (2.3), (2.4),(2.5) информ. окно № 2.4?).

Значение зубцового деления статора, мм.

$$t_1 = \pi D \cdot 10^3 / Z_1. \qquad (2.3)$$

Проверка правильности размера зубцового деления статора, мм

$$\Delta t_1 = t_1 - 6. \qquad (2.4)$$

Число пазов статора на полюс и фазу, паз

$$q = Z_1/(2p \cdot m_1). \tag{2.5}$$

Таблица 2.1

Рекомендуемые числа пазов короткозамкнутых асинхронных двигателей

2p	Число пазов статора	Число пазов ротора (пазы без скоса)
2	12	9*, 15*
	18	11*, 12*, 15*, 21*, 22
	24	15*, (16*), 17*, 19, 32
	30	22, 38
	36	26, 28, 44, 46
	42	32, 33, 34, 50, 52
	48	38, 40, 56, 58
4	12	9*
	18	10*, 14*
	24	15*, 16*, 17, (32)
	36	26, 44, 46
	42	(34), (50), 52, 54
	48	34, 38, 56, 58, 62, 64
	60	50, 52, 68, 70, 74
	72	62, 64, 80, 82, 86
6	36	26, 46, (48)
	54	44, 50, 64, 66, 68
	72	56, 58, 62, 82, 84, 86, 88
	90	74, 76, 78, 80, 100, 102, 104
8	48	(34), 36, 44, 62, 64
	72	56, 58, 86, 88, 90
	84	66, (68), 70, 98, 100, 102, 104
	96	78, 82, 110, 112, 114

Примечания. 1. В скобках взяты числа пазов, при которых возможно повышение вибрации двигателей.

2. Звездочкой отмечены числа пазов, применяемые в основном в машинах малой мощности.

Информационное окно № 2.4
Проверка правильности расчета зубцового деления и числа пазов на полюс и фазу

Значение зубцового деления статора t_1=... мм.

Проверка правильности размера зубцового деления $\Delta\ t_1$=... мм.

Число пазов на полюс и фазу q =... паз.

При правильном выборе числа пазов статора должны выполняться следующие условия: $\Delta t_1 \geqslant 0$; q— целое число.

Корректировка расчета (Да – информ. окно № 2.3. Нет – информ. окно № 2.5?).

Комментарий. При корректировке иеобходимо вернуться к информационному окну № 2.3, что позволит изменить значения чисел пазов статора и ротора.

Информационное окно № 2.5
Варианты значений параллельных ветвей обмотки статора

Программа расчета на ЭВМ предусматривает применение двух типов трехфазных обмоток: однослойной концентрической (идентификатор 1) и двухслойной петлевой с укороченным шагом и целым числом пазов на полюс и фазу (идентификатор 2).

Наиболее крупным фрагментом фазной обмотки является катушечная группа, которая представляет собой «q» последовательно соединенных между собой катушек, расположенных в соседних пазах фазной зоны. Несколько соединенных между собой катушечных групп образуют фазу обмотки. Катушечные группы в фазе могут соединяться последовательно (a = 1), по последовательно-параллельной схеме (a > 1) или параллельно ($a = a_{max}$). Если a > 1, то в каждой параллельной ветви должно быть одинаковое число катушечных групп.

В магнитном поле катушечные группы фазы располагаются симметрично, поэтому они смещаются относительно друг друга в одно-

слойной обмотке на два полюсных деления, а двухслойной — на одно полюсное деление.

В однослойных концентрических обмотках количество катушечных групп в фазе $КГ_ф = p$, а двухслойных петлевых — $КГ_ф=2p$.

Введите все возможные варианты значений параллельных ветвей обмотки статора.

Необходимая для принятия решения информация:

— идентификатор обмотки ...;

— число полюсов $2p$ = ...;

— максимальное число параллельных ветвей однослойной обмотки (идентификатор 1)

$$a_{max} = 2p/2;$$

— максимальное число параллельных ветвей двухслойной обмотки (идентификатор 2)

$$a_{max} = 2p.$$

Возможные варианты выбираются по условию:

для однослойной обмотки $2p/2a$ — целое число;

для двухслойной обмотки $2p/a$ — целое число.

Для всех значений параллельных ветвей, не удовлетворяющих перечисленным условиям, ввести значения, равные нулю.

Возможные варианты значений параллельных ветвей обмотки статора:

a_1=...?	a_3=...?	a_5=...?	a_7=...?
a_2=...?	a_4=...?	a_6=...?	a_8=...?

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 2.5. Нет — формулы (2.6)—(2.14) информ. окно № 2.6?).

Комментарий. При вводе в ЭВМ значений параллельных ветвей пользователь должен целенаправленно составить перечень вариантов. Например:

а) обмотка однослойная (1), $2p = 8$, возможные варианты значений параллельных ветвей ($2p/2a=p/a$ — целое число):

$a_1=1$ $a_3=0$ $a_5=0$ $a_7=0$

$a_2=2$ $a_4=4$ $a_6=0$ $a_8=0$

б) обмотка двухслойная (2), $2p=8$, возможные варианты значений параллельных ветвей ($2p/a$ — целое число):

$a_1=1$ $a_3=0$ $a_5=0$ $a_7=0$

$a_2=2$ $a_4=4$ $a_6=0$ $a_8=8$

После ввода пользователем всех возможных вариантов значений параллельных ветвей и ответе «Нет» ЭВМ производит следующие вычисления:

предварительное значение фазного тока статора, А

$$I_{1\text{н пред}} = (P_{2\text{н}} \cdot 10^3)/(m_1 \cdot U_{1\text{н}} \cdot \eta_{\text{н пред}} \cdot \cos\varphi_{\text{н пред}}); \quad (2.6)$$

предварительное значение числа эффективных проводников при $a_1=1$

$$u_{\text{п}1} = (\pi D A_{\text{пред}}) / (I_{1\text{н пред}} \cdot Z_1); \quad (2.7)$$

предварительные значения чисел эффективных проводников при $a_1>1$

$$u_{\text{п}2} = a_2 \cdot u_{\text{п}1}; \quad (2.8)$$

$$u_{\text{п}3} = a_3 \cdot u_{\text{п}1}; \quad (2.9)$$

$$u_{\text{п}4} = a_4 \cdot u_{\text{п}1}; \quad (2.10)$$

$$u_{\text{п}5} = a_5 \cdot u_{\text{п}1}; \quad (2.11)$$

$$u_{\text{п}6} = a_6 \cdot u_{\text{п}1}; \quad (2.12)$$

$$u_{п7} = a_7 \cdot u_{п1};$$ (2.13)

$$u_{п8} = a_8 \cdot u_{п1}.$$ (2.14)

После вычислений (2.6)—(2.14) на экран монитора выводится информациоиное окно № 2.6.

Информационное окно № 2.6
Выбор чисел параллельных ветвей и эффективных проводников обмотки статора

Расчетные значения чисел эффективных проводников в пазу статора:

$a_1 = \ldots$; $u_{п1} = \ldots$;

$a_2 = \ldots$; $u_{п2} = \ldots$;

$a_3 = \ldots$; $u_{п3} = \ldots$;

$a_4 = \ldots$; $u_{п4} = \ldots$;

$a_5 = \ldots$; $u_{п5} = \ldots$;

$a_6 = \ldots$; $u_{п6} = \ldots$;

$a_7 = \ldots$; $u_{п7} = \ldots$;

$a_8 = \ldots$; $u_{п8} = \ldots$.

Выбрать и ввести в ЭВМ рациональное число эффективных проводников в пазу статора и соответствующее ему число параллельных ветвей.

Необходимая для принятия решения информация:

— идентификатор обмотки...;

— $u_п$ должно быть целым числом, если обмотка однослойная (1);

— $u_п$ должно быть целым четным числом, если обмотка двухслойная (2);

— если обмотка однослойная (1), то необходимо выбрать вариант расчетного $u_п$, наиболее близко подходящий к целому числу, и округлить это значение $u_п$ до целого числа;

— если обмотка двухслойная (2), то необходимо выбрать вариант расчетного $u_п$, наиболее близко подходящий к целому четному числу, и округлить это значение $u_п$ до целого четного числа.

Рациональное число эффективных проводников в пазу статора

$u_п$=...?

Число параллельных ветвей обмотки статора

a=...?

Корректировка расчета (Да — информ.. окно № 2.6. Нет — формулы (2.15)—(2.23), информ. окно № 2.7?).

Комментарий. Принятые на данном этапе числа параллельных ветвей и эффективных проводников могут быть изменены при выборе количества элементарных проводников в одном эффективном.

В качестве примера выбора рационального числа эффективных проводников в пазу статора и соответствующего ему числа параллельных ветвей рассмотрим двигатель с числом полюсов $2p$=6 и двухслойной (2) обмоткой статора.

При расчете получено:

a_1=1, $u_{п1}$=6,61,

a_2=2, $u_{п2}$=13,22,

a_3=3, $u_{п3}$=19,83,

a_4=0, $u_{п4}$=0,00,

a_5=0, $u_{п5}$=0,00,

a_6=6, $u_{п6}$=39,66,

a_7=0, $u_{п7}$=0,00,

a_8=0, $u_{п8}$=0,00.

Наиболее близко к целому четному чнслу подходят значения $u_{п3}$=19,83 при a_3=3 и $u_{п6}$=39,66 при a_6=6. Для дальнейшего расчета пользователь может выбрать любой из них. Например, $u_{п3}$=20, a_3=3 или $u_{п6}$=40, a_6=6. Выбирая рациональное число эффективных проводников, пользователь должен учитывать, что значение реактивного сопротивления x_1 прямо пропорционально $u_п^2$, а начальный пусковой и максимальный моменты уменьшаются при увеличении реактивных сопротивлений статора и ротора. Поэтому предпочтительным является вариант: $u_{п3}$=20, a_3=3.

Введенное пользователем рациональное число эффективных проводников в пазу статора и число параллельных ветвей проверяются в программе по следующим условиям.

Число эффективных проводников в ЭВМ округляется до целого путем отбрасывания дробной части

$$u_{п.окр.} = INT(u_п) . \qquad (2.15)$$

После этого находится разность

$$\Delta u_п = u_п - u_{п\,окр.} . \qquad (2.16)$$

При правильном выборе числа эффективных проводников разность $\Delta u_п = 0$.

Для двухслойной обмотки (2) проводится дополнительная проверка. Рассчитывается число эффективных проводникоғ в одном слое

$u_{сл}$=0,5$u_п$, если идентификатор обмотки (2). (2.17)

Это число округляется в ЭВМ до целого путем отбрасывания дробной части

$$u_{сл.окр.} = INT(u_{сл}) . \qquad (2.18)$$

После это находится разность

$$\Delta u_{сл} = u_{сл} - u_{сл\,окр}\,. \qquad (2.19)$$

При правильном выборе числа эффективных проводников $\Delta u_{сл} = 0$.

В программе также предусмотрена проверка правильности выбора числа параллельных ветвей. С этой целью рассчитывается число катушечных групп в одной параллельной ветви:

$$КГ_в=2p/2a, \text{ если идентификатор обмотки 1.} \qquad (2.20)$$

$$КГ_в=2p/a, \text{ если идентификатор обмотки 2.} \qquad (2.21)$$

Число катушечных групп округляется в ЭВМ до целого путем отбрасывания дробной части

$$КГ_{в\,окр}=INT(КГ_в). \qquad (2.22)$$

После этого находится разность

$$\Delta КГ_в = КГ_в - КГ_{в\,окр}. \qquad (2.23)$$

При правильном выборе числа параллельных ветвей $\Delta КГ_в=0$.

После проверки правильности выбора чисел параллельных ветвей и эффективных проводников рассчитываются следующие данные обмотки статора:

— число катушек в одной катушечной группе, кат.

$$K_{гр} = q; \qquad (2.24)$$

— полюсное деление в пазах

$$\tau_п = Z_1/2p; \qquad (2.25)$$

— смещение начал фаз обмотки статора относительно друг друга в пазах

$$C_{ф} = 2\tau_{п}/3. \qquad (2.26)$$

По окончанию вычислений (2.15)–(2.26) на экран монитора выводится информационное окно № 2.7.

Информационное окно № 2.7 Проверка правильности выбора числа эффективных проводников в пазу статора и числа параллельных ветвей

Проверка правильности выбора числа эффективных проводников в пазу статора и числа параллельных ветвей приводятся ниже:

— число полюсов $2p$ =...;

— идентификатор обмотки ... ;

— число эффективных проводников в пазу статора $u_{п}$ = ... ;

— проверка правильности выбора числа эффективных проводников $\Delta u_{п}$ = ... (при правильном выборе $\Delta u_{п}$ =0);

— проверка правильности выбора числа эффективных проводников в слое (только для двухслойных обмоток) $\Delta u_{сл}$ = ..., если идентификатор обмотки 2 (при правильном выборе $\Delta u_{сл}$ =0);

— проверка правильности выбора числа параллельных ветвей $\Delta КГ_{в}$=... (при правильном выборе $\Delta КГ_{в}$=0).

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 2.6. Нет — информ. окно № 2.8?).

Информационное окно № 2.8 Расчет трехфазной обмотки статора

Введите выбранный Вами в предыдущем расчете (информ. окно № 1.8) тип обмотки статора.

Однослойная концентрическая обмотка (идентификатор 1) — Да? (формулы (2.27)–(2.34))

Двухслойная петлевая обмотка
(идентификатор 2) — Да?
(формулы (2.35)–(2.39) и (2.32)–(2.34))

Расчет однослойной концентрической обмотки

Число катушечных групп в фазе

$$КГ_ф = 2p/2. \qquad (2.27)$$

Смещение катушечных групп фазы относительно друг друга, паз

$$C_{гр} = 2\tau_п. \qquad (2.28)$$

Наружный шаг обмотки, паз

$$y_{нар} = 4q - 1. \qquad (2.29)$$

Внутренний шаг обмотки, паз

$$y_{вн} = 2q + 1. \qquad (2.30)$$

Относительный шаг однослойной обмотки

$$\beta_1 = 1 \qquad (2.31)$$

Коэффициент укорочения шага обмотки

$$k_{y1} = \sin(\beta_1 \cdot 90°). \qquad (2.32)$$

Коэффициент распределения обмотки

$$k_{p1} = 0{,}5/(q \cdot \sin(30°/q)). \qquad (2.33)$$

Обмоточный коэффициент

$$k_{об1} = k_{у1} \cdot k_{р1}\,. \tag{2.34}$$

Конструирование обмотки (приложение 1).

Расчет двухслойной петлевой обмотки

Число катушечных групп в фазе

$$КГ_ф = 2p. \tag{2.35}$$

Смещение катушечных групп фазы относительно друг друга, паз

$$C_{гр} = \tau_п\,. \tag{2.36}$$

Предварительное значение шага обмотки, паз:

$$y_{пред.} = 0{,}6\tau_п\,,\ \text{если}\ 2p = 2; \tag{2.37}$$

$$y_{пред.} = 0{,}8\tau_п\,,\ \text{если}\ 2p > 2. \tag{2.38}$$

После расчета по формулам (2.35)—(2.38) на экран монитора выводится предварительное значение шага обмотки:

— обмотка статора двухслойная петлевая с укороченным шагом;

— предварительное значение шага обмотки $y_{пред}$=... паэ.

Округлите значение предварительного шага обмотки до ближайшего целого числа и полученное значение введите в ЭВМ.

y=...? паз

Относительный шаг обмотки

$$\beta_1 = y/\tau_п\,. \tag{2.39}$$

После вычисления β_1 на экран монитора выводятся:

— полюсное деление в пазах $\tau_п$ = ...паз;

— шаг обмотки в пазах y=... паэ;

(значения $\tau_п$ и y должны быть целыми числами).

— относительный шаг обмотки $\beta_1 = \dots$.

При правильном расчете относительный шаг должен лежать в следующих пределах:

$$\beta_1 = 0{,}58 - 0{,}63, \text{ если } 2p = 2;$$

$$\beta_1 = 0{,}78 - 0{,}83, \text{ если } 2p > 2.$$

Коэффициенты укорочения шага, распределения и обмоточный для двухслойной обмотки рассчитываются по формулам (2.32), (2.33) и (2.34), причем при расчете коэффициента укорочения шага двухслойной обмотки в формулу (2.32) подставляется значение относительного шага, вычисленное по формуле (2.39).

Конструирование обмотки (приложение 2).

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 2.8. Нет — информ. окно № 2.9?).

Информационное окно № 2.9
Данные обмотки статора

Однослойная концентрическая обмотка (идентификатор обмотки 1):

1. Число фаз обмотки статора	$m_1 = \dots$
2. Число полюсов магнитного поля	$2p = \dots$
3. Число пазов статора	$Z_1 = \dots$ паз
4. Число параллельных ветвей фазной обмотки статора	$a = \dots$
5. Число катушечных групп в фазе	$КГ_ф = \dots$
6. Число катушек в катушечной группе	$К_{гр} = q = \dots$
7. Наружный шаг обмотки	$y_{нар} = \dots$ паз
8. Внутренний шаг обмотки	$y_{вн} = \dots$ паз
9. Относительный шаг обмотки	$\beta_1 = 1$
10. Полюсное деление	$\tau_п = \dots$ паз
11. Смещение начал фаз обмотки друг относительно друга	$С_ф = \dots$ паз

12. Смещение катушечных групп фазы относительно друг друга	$C_{гр}$=... паз
13. Коэффицнент укорочення шага	k_{y1} = ...
14. Коэффициент распределения	k_{p1} = ...
15. Обмоточный коэффициент	$k_{об1}$ = ...

Двухслойная петлевая обмотка (идентификатор 2):

1. Число фаз обмотки статора	m_1=...
2. Число полюсов магнитного поля	$2p$=...
3. Число пазов статора	Z_1=..., паз
4. Число параллельных ветвей фазной обмотки статора	a = ...
5. Число катушечных групп в фазе	$КГ_ф$=...
6. Число катушек в катушечной группе	$К_{гр}$ =q =...
7. Шаг обмотки	y =... паз
8. Относительный шаг обмотки	$β_1$=...
9. Полюсное деление	$τ_п$=...паз
10. Смещение начал фаз обмотки относительно друг друга	$C_ф$=... паз
11. Смещение катушечных групп фазы относительно друг друга	$C_{гр}$=...паз
12. Коэффицнент укорочения шага	k_{y1} = ...
13. Коэффициент распределения	k_{p1} = ...
14. Обмоточный коэффициент	$k_{об1}$ = ...

По расчетным данным составьте схему-таблицу укладки катушек обмотки в пазы, начертите условную схему фазы А и схему трехфазной обмотки (см. приложения 1,2).

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 2.8. Нет — формулы (2.40)—(2.45) информ. окно № 2.10?).

Число витков в фазе статора, вит.:

$$W_1 = (u_п \cdot Z_1)/(2a \cdot m_1). \tag{2.40}$$

Расчетное значение линейной нагрузки, А/м:

$$A = (2I_{1н} \cdot W_1 \cdot m_1)/(\pi \cdot D). \quad (2.41)$$

Отклонение расчетного значения линейной нагрузки от ранее принятой, %:

$$\Delta A = \frac{A - A_{пред.}}{A} \cdot 100. \quad (2.42)$$

Отклонение ΔA не должно превышать $\pm(5 \div 10)$ %.

Расчетное значение магнитного потока, Вб:

$$\Phi = (K_Е \cdot U_{1н})/(4{,}44 W_1 \cdot k_{об1} \cdot f_{1н}). \quad (2.43)$$

Расчетное значение индукции в воздушном зазоре, Тл:

$$B_\delta = (2\,p \cdot \Phi)/(2\,D \cdot l_\delta). \quad (2.44)$$

Отклонение расчетного значения индукции в воздушном зазоре, %:

$$\Delta B_\delta = \frac{B_\delta - B_{\delta.пред}}{B_\delta} \cdot 100. \quad (2.45)$$

Отклонение ΔB_δ не должно превышать $\pm(5 \div 10)$ %.

После выполнения расчетов (2.40)—(2.45) на экран монитора выводится информационное окно № 2.10.

Информационное окно № 2.10
Расчетные значения электромагнитной нагрузки проектируемого двигателя

Введенное в ЭВМ значение линейной нагрузки

$A_{пред.}$=..., А/м;

Расчетное значение линейной нагруэки

$A = \ldots$, А/м;

Отклонение

$\Delta A = \ldots, \%$;

Отклонение ΔA не должно превышать

$\pm(5 \div 10)$ %;

Введенное в ЭВМ значение индукции в воздушном зазоре

$B_{\delta.\text{пред}} = \ldots$, Тл;

Расчетное значение индукции в воздушном зазоре

$B_\delta = \ldots$, Тл;

Отклонение

$\Delta B_\delta = \ldots, \%$;

Отклонение ΔB_δ не должно превышать

$\pm(5 \div 10)$ %.

Комментарий. В случае превышения ΔA и ΔB_δ указанных значений необходимо провести коррекцию расчета функции $A = f(u_п, D)$ и $B_\delta = f(D, l_\delta)$. В свою очередь внутренний диаметр статора $D = f(K_D)$. Коэффициент K_D пользователь при расчете может варьировать в заданных пределах (см. табл. 1.2). Кроме этого, если отклонение ΔA велико, то следует проверить правильность выбора числа эффективных проводников $u_п$. Если отклонение ΔB_δ велико, то следует изменить l_δ. Расчетную длину воздушного зазора при этом надо определить, используя полученные знания A и B_δ (формула 1.5).

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 1.5 или 1.7. Нет — информ. окно № 2.11?).

Информационное окно № 2.11
Значение произведения линейной нагрузки на плотность тока в обмотке статора

Введите значение произведения линейной нагрузки на плотность тока $(A \cdot J_1)$.

Необходимая для принятия решения информация:

— общего назначения или взрывозащищенный;

— число полюсов

$$2p = \ldots;$$

— высота оси вращения

$$h = \ldots, \text{ мм};$$

— наружный диаметр статора

$$Da = \ldots, \text{ м};$$

— степень защиты

IP… .

Значение произведения линейной нагрузки на плотность тока определить:

— рис. 2.2, *а*, если степень защиты IP44, IP54 $h \leqslant 132$ мм;

— рис. 2.2, *б*, если степень защиты IP44, IP54 $h \in [160,250]$ мм;

— рис. 2.2, *в*, если степень защиты IP23, $h \in [160,250]$ мм.

Для взрывозащищенного двигателя, определенное по рис. 2.2, *а*, *б* значение $(A \cdot J_1)$, необходимо уменьшить в той же пропорции, что и линейную нагрузку (см. инф. окно № 1.7).

$$(A \cdot J_1) = (0{,}93 - 0{,}88)(A \cdot J_1)^{(\text{табл})},$$

где $(A \cdot J_1)^{(\text{табл})}$ — значение, определенное по рис. 2.2, *а*, *б*.

$(A \cdot J_1) = \ldots ?$ $\text{А}^2/\text{м}^3$

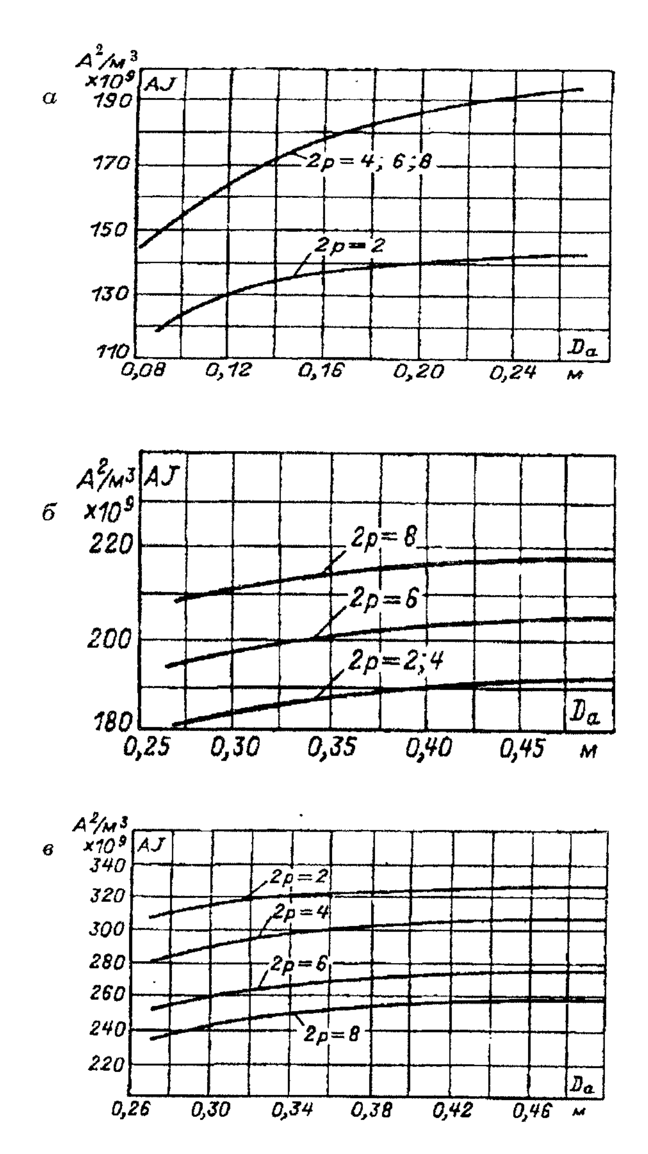


Рис. 2.2. Средние значения произведения (AJ) асинхронных двигателей:
а – при высоте оси вращения $h \leq 132$ мм и степени защиты IP44, IP54; *б* – h=160÷250 мм и степеви защиты IP44, IP54; *в* – h= 160÷250 мм и степени защиты IP23

Введите значение ширины шлица паза статора (табл. 2.2).

$b_{ш(1)}$=...?мм

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 2.11. Нет — формулы (2.46)—(2.48) информ. окно № 2.12?).

Предварительное значение плотности тока в обмотке статора, А/мм^2:

$$J_{1\,пред} = ((A \cdot J_1)/A) \cdot 10^{-6}. \quad (2.46)$$

Таблица 2.2

Средние значения ширины шлица полузакрытых пазов статора $b_{ш(1)}$, мм

h, мм	Число полюсов $2p$		
	2	4	6—8
50—63	1,8	1,8	1,8
71	2,0	2,0	2,0
80, 90	3,0	3,0	2,7
100, 112	3,5	3,5	3,0
132	4,0	3,5	3,5
160—250	4,0	3,7	3,7

Предварительное значение площади поперечного сечения эффективного проводника, мм^2:

$$q_{эф\,пред.} = I_{1н.пред.}/(a \cdot J_{1.пред.}). \quad (2.47)$$

Коэффициент эффективного проводника

$$K_ф = q_{эф.пред.}/2{,}22. \quad (2.48)$$

Комментарий. Для обмоток асинхронных двигателей с изоляцией класса нагревостойкости F применяют круглые медные провода с эмалевой изоляцией ПЭТ-155, а при классе нагревостойкости Н — круглые медные провода с эмалевой изоляцией ПЭТ-200 (приложение 3). По технологическим условиям изготовления обмотки статора вводятся следующие ограничения на параметры обмоточного провода:

$$d_{из} \leqslant 1{,}765 \text{ мм};$$

$$q_{эл} \leqslant 2{,}22 \text{ мм}^2;$$

$$\Delta b_{ш} = (b_{ш(1)} - d_{из}) \geqslant 1{,}5 \text{ мм};$$

$$n_{эл} \leqslant 4, \text{ если } 2p > 2,$$

где $d_{из}$ — диаметр стандартного изолированного провода;

$q_{эл}$ — площадь поперечного сечения неизолнрованного стандартного провода;

$n_{эл}$ — количество элементарных проводников в одном эффективном.

При $2p=2$ количество элементарных проводников в одном эффективном не ограничивается, но в этом случае пользователь должен выбрать вариант с наименьшим количеством элементарных проводников в одном эффективном, т. е. вариант, когда $a = a_{max}$.

Если выполняется условие $K_ф \leqslant 1$, то предварительно считают, что $n_{эл}=1$, и выбирают стандартный обмоточный провод (см. приложение 3) по условию $q_{эл} \approx q_{эф.пред.}$.

Значение диаметра стандартного провода проверяется по условию

$$\Delta b_{ш} = (b_{ш(1)} - d_{из}) \geq 1{,}5 \text{ мм}.$$

Если $\Delta b_{ш} < 1{,}5$, то эффективный проводник разбивают на элементарные при соблюденни условий:

$$q_{эл} \cdot n_{эл} \approx q_{эф\ пред.};$$

$$n_{эл} \leqslant 4, \text{ если } 2p > 2.$$

Если $K_ф$ значительно меньше единицы, то это свидетельствует о том, что выбранное число параллельных ветвей завышено. Необходимо перейти на вариант расчета с меньшим числом параллельных ветвей.

Если $K_ф > 1$, то стандартный провод выбирают при соблюдении следующих условий:

$$q_{эл} \cdot n_{эл} \approx q_{эф.пред};$$

$$n_{эл} \leqslant 4, \text{ если } 2p > 2;$$

$$\Delta b_ш = (b_{ш(1)} - d_{из}) \geq 1{,}5 \text{ мм}.$$

Например, число $2p = 4$, высота оси h =250 мм. По табл. 2.2 выбрано значение ширины шлица паза статора $\Delta b_ш = 3{,}7$ мм. Получено предварительное значение площади поперечного сечения эффективного проводника $q_{эф\ пред} = 4{,}92$ мм^2, коэффициент $K_ф$=2,22. В связи с тем, что $K_ф > 1$, эффективный проводник разбиваем на элементарные, используя уравнение $q_{эл\ пред} = q_{эф.пред.}/n_{эл}$, (табл. 2.3). При $2p = 4$ максимальное число элементарных проводов $n_{эл\ max}$= 4. По значениям $q_{эл.пред.}$ подбираем стандартный провод (см. приложение 3), сечение которого наиболее близко к рассчитанному $q_{эл.пред.}$.

Таблица 2.3

Выбор стандартных элементарных проводников

$n_{эл}$	2	3	4
$q_{эл.пред}$, мм^2	2,46	1,64	1,23
$q_{эл}$, мм^2 (см. прилож. 3)	2,57	1,539	1,227
$d_{из}$, мм (см. прилож. 3)	1,905	1,485	1,33
$q_{эл} \cdot n_{эл}$, мм^2	5,14	4,617	4,908

Выбираем вариант $n_{эл}$=4, так как в этом случае $q_{эл} \cdot n_{эл} \approx q_{эф.пред.}$, $d_{из}$< 1,765 и $\Delta b_ш$=3,7 – 1,33=2,37>1,5 мм.

Следовательно, для дальнейшего расчета принимаем: $n_{эл}$=4, $d_{из}$=1,33 мм, $q_{эл}$ = 1,227 мм^2.

В связи с тем, что по требованиям технического задания на разработку асинхронного двигателя необходимо применять изоляционные материалы с классом нагревостойкости F и H, выбираем марку провода ПЭТ-155А с классом нагревостойкости эмалевой изоляции F.

После выбора числа элементарных проводников в одном эффективном, маркн провода и его размеров пользователь вводит эти данные в ЭВМ (информационное окно № 2.12).

Информационное окно № 2.12
Выбор стандартного обмоточного провода

Выберите количество элементарных проводников в одном эффективном, диаметр и площадь поперечного сечения стандартного элементарного провода и марку провода.

Необходимая для принятия решения информация:

— число полюсов $2p=\ldots$;

— предварительное значение сечения эффективного проводника

$$q_{\text{эф.пред.}}=\ldots,\ \text{мм}^2;$$

— коэффициент эффективного проводника $K_{\text{ф}}=\ldots$;

— ширина шлица паза статора $b_{\text{ш}(1)}=\ldots$ мм.

Количество элементарных проводников в одном эффективном должно быть $n_{\text{эл}}\leqslant 4$, если $2p>2$. Если это условие не выполняется, то необходимо увеличить число параллельных ветвей.

При $2p=2$ количество элементарных проводников в одном эффективном может быть больше четырех, но в этом случае необходимо принять $a = a_{\max}$.

Количество элементарных проводников в одном эффективном

$n_{\text{эл}}=\ldots$?

Диаметр стандартного изолированного провода (см. приложение 3).

$d_{\text{из}}=\ldots$?мм

Площадь поперечного сечения неизолированного стандартного провода (см. приложение 3)

$$q_{эл} = \ldots ?\text{мм}^2$$

Марка обмоточного провода

...?

Класс нагревостойкости эмалевой изоляции провода

...?

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 2.11. Нет — формулы (2.49)—(2.51), информ. окно № 2.13?).

Проверка правильности выбора диаметра стандартного элементарного провода, мм:

$$\Delta d = 1{,}765 - d_{из}; \tag{2.49}$$

$$\Delta b_ш = b_{ш(1)} - d_{из}. \tag{2.50}$$

Проверка правильности выбора количества элементарных проводов в одном эффективном:

$$\Delta n = 4 - n_{эл}. \tag{2.51}$$

После выполнения расчетов (2.49)—(2.51) на экран монитора выводится информационное окно № 2.13.

Информационное окно № 2.13
Проверка правильности выбора обмоточного провода

Марка обмоточного провода должна соответствовать классам нагревостойкости *F* или *H*.

Проверка правильности выбора диаметра элементарного проводника:

$$\Delta d = \ldots \text{ мм};$$

$$\Delta b_ш = \ldots \text{ мм.}$$

При правильном выборе $\Delta d \geq 0$, а $\Delta b_ш \geq 1{,}5$ мм.

Проверка правильности выбора количества элементарных проводов в одном эффективном $\Delta n = \ldots$

При правильном выборе $\Delta n \geqslant 0$, если $2p > 2$.

Если $2p = 2$, то условие $\Delta n \geqslant 0$ может не выполняться.

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 2.12. Нет — формулы (2.52)—(2.56), информ. окно № 2.14?).

Площадь поперечного сечения эффективного проводника, мм^2

$$q_{эф} = q_{эл} \; n_{эл} . \tag{2.52}$$

Расчетная плотность тока в обмотке статора, А/мм^2

$$J_1 = I_{1н\,пред} / (a \cdot q_{эф}) . \tag{2.53}$$

Отклонение расчетной плотности тока от ранее выбранной, %

$$\Delta J_1 = \frac{J_1 - J_{1пред.}}{J_1} \cdot 100 . \tag{2.54}$$

При правильном выборе количества элементарных проводов и диаметра обмоточного провода ΔJ_1 не должно превышать $\pm(5 \div 10)$ %.

Минимально допустимое значение плотности тока, А/мм^2

$$J_{1.min} = 0{,}91 \cdot J_{1\,пред.} . \tag{2.55}$$

Максимально допустимое значенне плотности тока, А/мм^2

$$J_{1\,max} = 1{,}10 \cdot J_{1.пред} . \tag{2.56}$$

Информационное окно № 2.14
Плотность тока в обмотке статора

Предварительное значение плотности тока в обмотке статора

$$J_{1\,пред} = \dots\ А/мм^2.$$

Расчетная плотность тока

$$J_1 = \dots\ А/мм^2.$$

Отклонение

$$\Delta J_1 = \dots\%.$$

Минимально допустимое значение плотности тока

$$J_{1\,min} = \dots\ А/мм^2.$$

Максимально допустимое значение плотности тока

$$J_{1\,max} = \dots\ А/мм^2.$$

При правильном выборе количества элементарных проводов и диаметра обмоточного провода отклонение не должно превышать $\pm(5\div10)$ % и $J_{1\,min} \le J_1 \le J_{1\,max}$.

Оптимальные значения плотности тока в обмотках статоров взрывозащищенных обдуваемых электродвигателей находятся в пределах, приведенных на рис. 2.3, в зависимости от номинальной мощности электродвигателей.

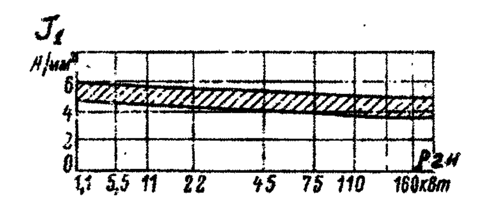


Рис. 2.3. Плотность тока в обмотках статора J_1 в зависимости от мощности взрывозащищенных электродвигателей

Если рассчитанная плотность тока в обмотке статора J_1 взрывозащищенного двигателя превышает более чем на 10 % верхний предел

зоны оптимальных значений (см. рис. 2.3), то необходимо принять расчетную плотность тока по верхней границе оптимальных значений (см. рис. 2.3) и пересчитать предварительное значение площади поперечного сечения эффективного проводника

$$q_{\text{эф.пред.}} = I_{1\text{н пред}} \,/\, (a\, J_{1\text{опт}}),$$

где $J_{1\text{опт}}$ (см. рис. 2.3).

После этого надо вернуться в инф. окно № 2.12 и по рассчитанному $q_{\text{эф пред.}}$ выбирать стандартный провод.

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 2.12. Нет — информ. окно № 2.15?).

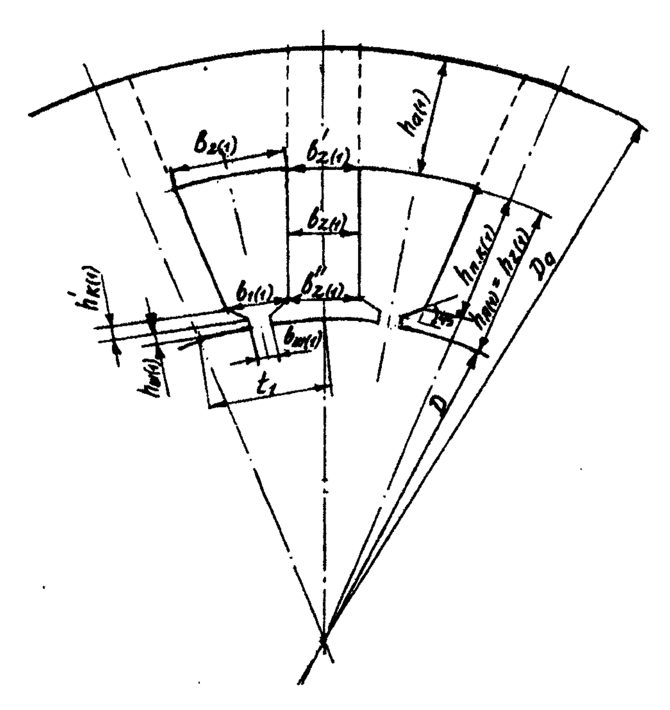


Рис. 2.4. Зубцовая зона статора

Таблица 2.4

Допуотимые значения индукции на различных участках магнитной цепи

Участок магнитной цепи	Обозначенне	Степень защиты							
		IP44, IP54				IP23			
	Число полюсов $2p$	2	4	6	8	2	4	6	8
Ярмо статора, Тл	$B_{a\min}-B_{a\max}$	1,4–1,6			1,15–1,35	1,45–1,6			1,2–1,4
Зубцы статора при постоянном сечении, Тл	$B_{Z1\min}-B_{Z1\max}$	1,6–1,9				1,8–2,05	1,7–1,95		
Ярмо короткозамкнутого ротора, Тл	B_j	≤ 1,45	≤ 1,4	≤ 1,2	≤ 1,0	≤ 1,55	≤ 1,5	≤ 1,3	≤ 1,1
Зубцы ротора при постоянном сечении, Тл	$B_{Z2\min}-B_{Z2\max}$	1,7–1,95				1,75–2			

Таблица 2.5

Изоляция однослойных и двуслойных всыпных обмоток статоров асинхронных двигателей с высотой оси вращения до 250 мм. Напряжение до 660 В. Классы изоляции В, Н, F

Рисунок	Тип обмотки	Высота оси вращения, мм	Позиция	Материал: наименование, марка — класс В	класс F	класс Н	Материал: толщина, мм	Число слоёв	Односторонняя толщина, мм
	однослойная	50—80		пленкостеклопласт					
			1	изофлекс	имидофлекс		0,2	1	0,2
			2	— " —	— " —		0,3	1	0,3
		90—132		пленкостеклопласт					
			1	изофлекс	имидофлекс		0,25	1	0,25
			2	— " —	— " —		0,35	1	0,35
		160		пленкостеклопласт					
			1	изофлекс	имидофлекс		0,4	1	0,4
			2	— " —	— " —		0,5	1	0,5
	двухслойная	180—250		пленкостеклопласт					
			1	изофлекс	имидофлекс		0,4	1	0,4
			2	— " —	— " —		0,4	1	0,4
			3	— " —	— " —		0,5	1	0,5

Примечание. Односторонняя толщина изоляции $b_{из}$ — позиция 1.

Комментарий. Для всыпной обмотки статора в двигателях применяются полузакрытые трапецеидальные пазы, размеры которых выбираются исходя из условия получения заданных значений индукций в зубцах и ярме статора при сохранении постоянства ширины зубцов. В таких пазах угол наклона граней клиновой части $\beta=45^\circ$, высота шлица $h_{ш(1)}=0{,}5$ мм, если $h\leqslant 132$ мм, и $h_{ш(1)}=1{,}0$ мм, если $h\geqslant 160$ мм (рис. 2.4).

Ширина шлица $b_{ш(1)}$ выбирается по табл. 2.2, причем она должна удовлетворять условию $b_{ш(1)}\geqslant(d_{из}+1{,}5$ мм).

Для определения размеров паза «в свету», т. е. с учетом припусков на шихтовку и сборку сердечников, необходимо ввести в ЭВМ значения этих припусков. При высоте двигателя h = 50—132 мм припуски по ширине и высоте паза следующие: $\Delta b_п = \Delta h_п = 0{,}1$ мм, а при высоте двигателя h = 160—250 мм $\Delta b_п = \Delta h_п = 0{,}2$ мм. При расчете коэффициента заполнения паза обмоточным проводом также необходимо учесть площадь корпусной изоляции и прокладок в пазу. Прокладки применяются только при укладке двухслойных обмоток (2). Односторонняя толщина пазовой изоляции $b_{из}$ определяется по табл. 2.5.

Необходимо помнить, что, согласно требованию технического задания, изоляционные материалы должны соответствовать классам нагревостойкости F и H.

Расчет недостающих размеров пазов и зубцов статора ведется исходя из допустимых значений индукций в зубцах и ярме статора. Минимальные и максимальные значения индукций определяются по табл. 2.4 и вводятся в ЭВМ.

Информационное окно № 2.15
Минимальные и максимальные значения индукций в ярме и зубцах статора

Введите миниимальные и максимальные значения индукций в ярме и зубцах статора (см. табл. 2.4).

Необходимая для принятия решения информация:

— степень защиты IP...;

— число полюсов $2p$=... .

Минимальное и максимальное значения индукции в ярме статора

$$B_{a.min}=...?\ Тл$$

$$B_{a.max}=...?\ Тл$$

Минимальное и максимальное значения индукции в зубцах статора

$$B_{Z1.min}=...?\ Тл$$

$$B_{Z1.max}=...?\ Тл$$

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 2.15. Нет — информ. окно № 2.16?).

Информационное окно № 2.16
Предварительные значения индукций в ярме и зубцах статора

Введите предварительные значения индукций в ярме и зубцах статора.

Необходимая для принятия решения информация:

— допустимый диапазон значений индукций в ярме статора:

$$B_{a.min}=...\ Тл;$$

$$B_{a.max}=...\ Тл;$$

— допустимый диапазон значений индукций в зубцах статора:

$$B_{Z1\ min}=...\ Тл,$$

$$B_{Z1.max}=...\ Тл.$$

Индукция в зубцах статора не должна превышать 2,1 Тл, а в ярме статора — 1,8 Тл.

Предварительное значение индукции в ярме статора

$B_{a\ пред}$=...? Тл

Предварительное значение индукции в зубцах статора

$B_{Z1\ пред}$=...? Тл

Корректировка расчета (Да — информ. окно 2.16. Нет — информ. окно № 2.17?).

Информационное окно № 2.17
Стандартные размеры паза статора и значения припусков

Введите известные размеры паза статора и значения припусков.

Необходимая для принятия решения информация:

— высота оси вращения h = ... мм:

если $h \leqslant$ 132мм, то $h_{ш(1)}$=0,5 мм;

если $h \geqslant$ 160мм, то $h_{ш(1)}$=1 мм;

— высота шлица паза статора

$h_{ш(1)}$=...? мм

— припуски по ширине и высоте паза статора:

если h=50—132 мм, то $\Delta b_п = \Delta h_п$=0,1 мм.

если h=160—250 мм, то $\Delta b_п = \Delta h_п$=0,2 мм.

$\Delta b_п = \Delta h_п$=...? мм

— односторонняя толщина корпусной изоляции класса нагревостойкости F или H (см. табл. 2.5)

$b_{из}$=... мм

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 2.17. Нет — формулы (2.57)—(2.79), информ. окно № 2.18?).

Предварительное значение ширины зубца статора (см. рис. 2.3)

$$b_{Z(1)}^{\text{пред}} = (B_\delta \cdot t_1 \cdot l_\delta)/(B_{Z1\,\text{пред}} \cdot l_{\text{ст}\,1} \cdot k_c),$$

где $l_{\text{ст}\,1} = l_{\text{ст}\,2} = l_\delta$ — длины магнитопроводов статора, ротора и воздушного зазора;

$k_c = 0{,}97$ — коэффициент заполнения пакета сталью при толщине листа 0,5 мм и изоляции посредством оксидирования.

Для асинхронных двигателей с $h \leqslant 250$ мм и $l_\delta \leqslant 300$ мм магнитопроводы статора и ротора собираются каждый в один пакет без радиальных и аксиальных каналов, поэтому $l_{\text{ст}\,1} = l_{\text{ст}.2} = l_\delta$.

В программу формула для вычисления предварительной ширины зубца статора введена в следующем виде, мм:

$$b_{Z(1)}^{\text{пред.}} = (B_\delta \cdot t_1)/(0{,}97 B_{Z1.\text{пред}}). \tag{2.57}$$

Высота ярма статора (см. рис. 2.3)

$$h_{a(1)} = \Phi\ /(2k_c \cdot B_{a.\text{пред}} \cdot l_{\text{ст}\,1}).$$

В программу эта формула введена в следующем виде, мм:

$$h_{a(1)} = \Phi \cdot 10^3/(1.94 \cdot B_{a\,\text{пред}} \cdot l_\delta). \tag{2.58}$$

Размеры паза статора в штампе (см. рис. 2.3), мм:

$$h_{\text{п}(1)} = 0{,}5(D_a - D)\ 10^3 - h_{a(1)}; \tag{2.59}$$

$$b_{2(1)} = \frac{\pi(D \cdot 10^3 + 2h_{\text{п}(1)})}{Z_1} - b_{Z(1)}^{\text{пред.}}. \tag{2.60}$$

Размер $b_{1(1)}$, соответствующий углу β=45° (см. рис. 2.3), мм:

$$b_{1(1)} = \frac{\pi(D \cdot 10^3 + 2h_{\text{ш}(1)} - b_{\text{ш}(1)}) - Z_1 b_{Z(1)}^{\text{пред}}}{Z_1 - \pi}. \tag{2.61}$$

Высота клиновой части паза статора, мм:

$$h_{к(1)} = 0{,}5(b_{1(1)} - b_{ш(1)}). \qquad (2.62)$$

Высота паза статора под укладку приводов, мм:

$$h_{п.к.(1)} = h_{п(1)} - (h_{ш(1)} + h_{к(1)}). \qquad (2.63)$$

Высота зубца статора, мм:

$$h_{Z(1)} = h_{п(1)}. \qquad (2.64)$$

Комментарий. В формулы (2.57)–(2.64) размеры D_a, D и l_δ должны подставляться с точностью — три знака после запятой, остальные размеры — с точностью два знака после запятой.

Результаты расчета по этим формулам необходимо округлить до десятых долей миллиметра (один знак после запятой).

Проверка зубца статора на параллельность граней, мм:

$$b'_{Z(1)} = \pi \frac{D \cdot 10^3 + 2(h_{ш(1)} + h_{к(1)})}{Z_1} - b_{1(1)}; \qquad (2.65)$$

$$b''_{Z(1)} = \pi \frac{D \cdot 10^3 + 2h_{п(1)}}{Z_1} - b_{2(1)}; \qquad (2.66)$$

$$\Delta b_{Z(1)} = b''_{Z(1)} - b'_{Z(1)}. \qquad (2.67)$$

При правильиом расчете $\left|\Delta b_{Z(1)}\right| \le 0{,}5$ мм.

Ширина зубца статора

$$b_{Z(1)} = 0{,}5(b'_{Z(1)} + b''_{Z(1)}). \qquad (2.68)$$

Отклонение от предварительной ширины зубца, мм:

$$\Delta b'_{Z(1)} = b_{Z(1)} - b^{пред.}_{Z(1)}. \qquad (2.69)$$

При правильном расчете $\left|\Delta b'_{Z(1)}\right| \le 1$ мм.

Площадь поперечного сечения паза статора в штампе, мм^2:

$$S_п = 0,5(b_{1(1)} + b_{2(1)}) \cdot h_{п\,к\,(1)}. \quad (2.70)$$

Степень использования пространства паза статора для размещения меди обмотки оценивается коэффициентом заполнения паза медью:

$$k_м = \frac{q_{эф} \cdot u_п}{S_п}. \quad (2.71)$$

Среднее значение коэффициента заполнения паза медью для всыпных обмоток $k_м \approx 0,3–0,4$.

Размеры паза статора в свету определяются с учетом припусков на шихтовку и сборку, мм:

$$b'_{1(1)} = b_{1(1)} - \Delta b_п; \quad (2.72)$$

$$b'_{2(1)} = b_{2(1)} - \Delta b_п; \quad (2.73)$$

$$h'_{п.к.(1)} = h_{п.к.(1)} - \Delta h_п. \quad (2.74)$$

Площадь корпусной изоляции, мм^2:

$$S_{из} = b_{из}(2h_{п(1)} + b_{1(1)} + b_{2(1)}). \quad (2.75)$$

Площадь прокладок в пазу статора, мм^2:

— если идентификатор 1,

$$S_{пр} = 0; \quad (2.76)$$

— если идентификатор 2,

$$S_{пр} = 0,4b_{2(1)} + 0,9b_{1(1)}. \quad (2.77)$$

Площадь поперечного сечения паза статора, остающаяся для размещения проводников обмотки, мм^2

$$S'_п = 0{,}5(b'_{1(1)} + b'_{2(1)}) \cdot h'_{п.к.(1)} - S_{из} - S_{пр}. \qquad (2.78)$$

Главная проверка правильности расчета размеров зубцовой зоны статора — коэффициент заполнения паза обмоточным проводом

$$k_з = \frac{d^2_{из} \cdot u_п \cdot n_{эл}}{S'_п}. \qquad (2.79)$$

Проверка правильности расчета геометрических размеров зубцовой зоны статора:

$$t'_{1пр} = \frac{\pi\,(D \cdot 10^3 + 2(h_{k(1)} + h_{ш(1)}))}{Z_1}, \qquad (2.80)$$

$$t''_{1пр} = b_{Z(1)} + b_{1(1)}, \qquad (2.81)$$

$$\Delta t_{1пр} = t'_{1пр} - t''_{1пр}. \qquad (2.82)$$

Если геометрические размеры зубцовой зоны рассчитаны правильно, то

$$\Delta t_{1пр} = 0.$$

Информационное окно № 2.18
Контроль правильности размещения обмотки в пазах магнитопровода статора

Коэффициент заполнения паза статора обмоточным проводом $k_з$=... .

При правильном размещении обмотки в пазах $k_з$ = 0,69—0,71 для двигателей с $2p$=2 и $k_з$=0,72—0,74 для двигателей $2p \geqslant 4$.

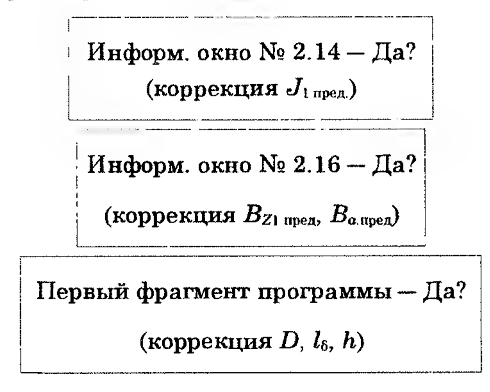
Рекомендации по коррекции расчета, если $k_з$ не входит в заданный диапазон.

Если полученное значение ниже указанных пределов, то площадь паза следует уменьшить за счет увеличения $h_{a(1)}$ или $b_{Z(1)}$ или обоих размеров одновременно, в зависимости от принятых при их расчете

значений индукции. Индукции в зубцах и ярме статора при этом уменьшатся. Уменьшение индукций ниже пределов, указанных в табл. 2.4, показывает, что главные размеры двигателя завышены и активная сталь недоиспользована. В этом случае следует уменьшить длину сердечника или перейти на ближайшую меньшую высоту оси вращения.

Часто расчет показывает, что значение $k_з$ оказывается выше указанных пределов. Это недопустимо, так как при чрезмерно высоких $k_з$ проводники обмотки во время укладки приходится очень сильно уплотнять в пазах. Их изоляция может быть повреждена или, по крайней мере, ослаблена, что вызовет резкое уменьшение надежности обмотки. Для уменьшения $k_з$ надо, взяв предельно допустимые значения $B_{Z1.пред}$ и $B_{а\,пред}$ (см. табл. 2.4), пересчитать размеры $b_{Z(1)}$ и $h_{a(1)}$. К уменьшению $k_з$ приводит также уменьшение числа элементарных проводников $n_{эл}$, которое возможно при одновременном пропорциональном увеличении площади поперечного сечения $q_{эл}$ или уменьшении числа параллельных ветвей обмотки с тем, чтобы плотность тока осталась неизменной. Если и при этом значение $k_з$ остается выше допустимого, следует сделать вывод, что принятые главные размеры двигателя занижены. Необходимо просчитать другой вариант, увеличив $l_δ$ или перейдя на большую высоту оси вращения.

Корректировка расчета:



Нет — информ. окно № 2.19?

Информационное окно № 2.19
Расчет размеров зубцовой зоны статора закончен. Проверка введенных данных

Число, месяц, год	...
Ваши фамилия, инициалы	...
Группа	...
Руководитель, должность, звание, фамилия, инициалы	...

Данные технического задания на проектирование асинхронного двигателя:

1. Тип двигателя	Асинхронный с короткозамкнутым ротором, обмотка ротора «беличья клетка» (заливка алюминием)
2. Назначение	Общего исполнения или взрывозащищенный
3. Номинальный режим работы	$S1$
4. Номинальная мощность	$P_{2н}$=... кВт
5. Номинальное напряжение	Y/Δ,... В
6. Число полюсов	$2p$ = ...
7. Базисная частота	$f_{1н}$=... Гц
8. Частоты сети, при которых рассчитываются рабочие характеристики двигателя	f_1=... Гц
9. Закон изменения напряжеиия или ЭДС статора в зависимости от частоты	$U_1/U_{1н}$=... $E_1/E_{1н}$=...
10. Степень защиты от воздействня окружающей среды	IP...
11. Способ охлаждения	IC...
12. Исполнение по способу монтажа	IM...
13. Климатические условия	....
14. Класс нагревостойкости изоляции	F
15. Маркировка взрывозащиты	......

Данные выбранного для дальнейшего расчета варианта главных размеров двигателя:

1. Высота оси вращения двигателя	h=... мм
2. Наружный диаметр магнитопровода статора	D_a=... м
3. Коэффициент K_E	K_E =...
4. Предварительное значение номинального КПД	$\eta_{н.пред.}$= ... о. е.
5. Предварительное значение номнинального коэффициента мощности	cos $\varphi_{н.пред}$=... о. е.
6. Предварительное значение индукции в воздушном зазоре	$B_{\delta.пред.}$=...Тл
7. Предварительное значение линейной нагрузки	$A_{пред.}$=... А/м
8. Идентификатор обмотки статора	...
9. Внутренний диаметр магнитопровода статора	D=... м
10. Расчетная длина воздушного зазора	l_δ=... м
11. Полюсное деление	τ = ... м

Данные, введенные в процессе расчета:

1. Предварительные макснмальное и минимальное значения зубцовых делений статора	$t_{1.пред}^{max}$ = ...м $t_{1.пред}^{max}$ = ...м
2. Чнсла пазов статора и ротора	Z_1=...паз Z_2=...паз
3. Число эффектнвных проводников в пазу статора	$u_п$=...
4. Число параллельных ветвей в фазе обмотки статора	a =...
5. Шаг двухслойной обмотки (идентификатор 2)	y = ...
6. Произведение линейной нагрузки иа плотность тока	(AJ_1)=...А^2/м^3
7. Ширина шлица паза статора	$b_{ш(1)}$=...мм
8. Количество элементарных проводников в одном эффективном	$n_{эл}$=...
9. Диаметр стандартного изолированного провода	$d_{из}$=... мм
10. Площадь поперечного сечения неизолированного стандартного провода	$q_{эл}$=...мм^2
11. Класс нагревостойкости эмалевой изоляции провода	...
12. Марка обмоточного провода	....

13. Минимальное и максимальное значения индукций в ярме и зубцах статора	$B_{a\,min}$=...Тл $B_{a\,max}$=...Тл $B_{Z1\,min}$=...Тл $B_{Z1\,max}$=...Тл
14. Предварительиые значения индукций в ярме и зубцах статора	$B_{a.пред.}$=...Тл $B_{Z1\,пред}$=...Тл
15. Высота шлица паза статора	$h_{ш(1)}$=...мм
16. Припуски по ширине и высоте паза статора	$\Delta b_п = \Delta h_п$=...мм
17. Одностороння толщина корпусной изоляции	$b_{из}$=...мм

Просмотр введенных данных закончен.

Повторить (Да — информ. окно № 2.19?).

Результаты расчета (Да — информ. окно № 2.20?).

Информационное окно № 2.20
Результаты расчета зубцовой зоны статора
Данные расчета

$Z_{1\,пред}^{min}$ = ... паз (2.1)

$Z_{1\,пред}^{max}$ = ... паз (2.2)

t_1=... мм (2.3)

Δt_1=... мм (2.4)

($\Delta t_1 \geqslant 0$)

q =... паз (2.5)

(q — целое число)

$I_{1н.пред}$=...А (2.6)

$u_{п1}$=... (2.7)

(a = 1)

$u_{п2}$=... (2.8)

$u_{п3}$=... (2.9)

$u_{п4}$=... (2.10)

$u_{п5}$=... (2.11)

$u_{п6}$=... (2.12)

$u_{п7}$=... (2.13)

$u_{п8}$=... (2.14)

$u_{п.окр.}$=... (2.15)

$\Delta u_п$=... (2.16)

($\Delta u_п$=0)

$u_{сл}=\ldots$ (2.17)

$u_{сл.окр}=\ldots$ (2.18)

$\Delta u_{сл}=\ldots$ (2.19)

($\Delta u_{сл}=0$ для двухслойной обмотки)

$КГ_в=\ldots$ (2.20)

(идентификатор 1)

$КГ_в=\ldots$ (2.21)

(идентификатор 2)

$КГ_{в\ окр.}=\ldots$ (2.22)

$\Delta КГ_в=\ldots$ (2.23)

($\Delta КГ_в=0$)

$К_{гр}=q=\ldots$ (2.24)

$\tau_п=\ldots$паз (2.25)

$C_ф=\ldots$паз (2.26)

Однослойная обмотка (2.27—2.34)

$КГ_ф=\ldots$ (2.27)

$C_{гр}=\ldots$паз (2.28)

$У_{нар}=\ldots$ паз (2.29)

$У_{вн}=\ldots$паз (2.30)

$\beta_1=1$ (2.31)

$k_{у1}=\ldots$ (2.32)

$k_{р1}=\ldots$ (2.33)

$k_{об1}=\ldots$ (2.34)

Двухслойная обмотка (2.35)—(2.39) и (2.32)—(2.34)

$КГ_ф=\ldots$ (2.35)

$C_{гр}=\ldots$паз (2.36)

$У_{пред.}=\ldots$паз (2.37)

($2p=2$)

$У_{пред.}=\ldots$паз (2.38)

($2p\geqslant 4$)

$\beta_1=\ldots$ (2.39)

($\beta_1=0,58—0,63$, если $2p=2$)

($\beta_1=0,78—0,83$, если $2p\geqslant 4$)

$k_{у1}=\ldots$ (2.32)

$k_{р1}=\ldots$ (2.33)

$k_{об1}=\ldots$ (2.34)

$W_1=\ldots$вит (2.40)

$A=\ldots$А/м (2.41)

$\Delta A=\ldots$ % (2.42)

$(|\Delta A| \leqslant 10\ \%)$

$\Phi = \ldots$ Вб (2.43)

$B_\delta = \ldots$ Тл (2.44)

$\Delta B_\delta = \ldots \%$ (2.45)

$(|\Delta B_\delta| \leq 10\ \%)$

$J_{1пред} = \ldots$ А/мм^2 (2.46)

$q_{эф.пред.} = \ldots$ мм^2 (2.47)

$K_ф = \ldots$ (2.48)

$\Delta d = \ldots$ мм (2.49)

$(\Delta d \geqslant 0)$

$\Delta b_ш = \ldots$ мм (2.50)

$(\Delta b_ш \geqslant 1{,}5$ мм$)$

$\Delta n = \ldots$ (2.51)

$(\Delta n \geqslant 0)$, если $2p \geqslant 4)$

$q_{эф} = \ldots$ мм^2 (2.52)

$J_1 = \ldots$ А/мм^2 (2.53)

$\Delta J_1 = \ldots \%$ (2.54)

$(|\Delta J_1| \leqslant 10\ \%)$

$J_{1.min} = \ldots$ А/мм^2 (2.55)

$J_{1.max} = \ldots$ А/мм^2 (2.56)

$b_{Z1}^{пред.} = \ldots$ мм (2.57)

$h_{a(1)} = \ldots$ мм (2.58)

$h_{п(1)} = \ldots$ мм (2.59)

$b_{2(1)} = \ldots$ мм (2.60)

$b_{1(1)} = \ldots$ мм (2.61)

$h_{к(1)} = \ldots$ мм (2.62)

$h_{п.к.(1)} = \ldots$ мм (2.63)

$h_{Z(1)} = \ldots$ мм (2.64)

$b'_{Z(1)} = \ldots$ мм (2.65)

$b''_{Z(1)} = \ldots$ мм (2.66)

$\Delta b_{Z(1)} = \ldots$ мм (2.67)

$(|\Delta b_{Z(1)} \leqslant 0{,}5$ мм$|)$

$b_{Z(1)} = \ldots$ мм (2.68)

$\Delta b'_{Z(1)} = \ldots$ мм (2.69)

$(|\Delta b'_{Z(1)} \leqslant 1$ мм$|)$

$S_п = \ldots$ мм^2 (2.70)

$k_м = \ldots$ (2.71)

$(k_м = 0{,}3\text{—}0{,}4)$

$b'_{1(1)} = \ldots$ мм (2.72)

$b'_{2(1)} = \dots$ мм (2.73)

$h'_{п.к(1)} = \dots$ мм (2.74)

$S_{из} = \dots$ мм^2 (2.75)

$S_{пр} = 0$ (2.76)

(идентификатор 1)

$S_{пр} = \dots$ мм^2 (2.77)

(идентификатор 2)

$S'_{п} = \dots$ мм^2 (2.78)

$k_з = \dots$ (2.79)

($k_з$=0,69—0,71, если $2p$=2)

($k_з$=0,72—0,74, если $2p \geqslant 4$)

$t'_{1\,пр} = \dots\dots$ мм (2.80)

$t''_{1\,пр} = \dots\dots$ мм (2.81)

$\Delta t_{1\,пр} = \dots\dots$ мм (2.82)

($\Delta t_{1\,пр} = 0$).

Просмотр результатов расчета закончен.

Повторить — (Да — информ. окно № 2.20?).

Печать: (Да — информ. окно № 2.9, № 2.19 и № 2.20?).

3. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НА ЭВМ ВЕЛИЧИНЫ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ РОТОРА

(третий фрагмент программы)

Правильный выбор воздушного зазора δ во многом определяет энергетические показатели асинхронного двигателя. Чем меньше воздушный зазор, тем меньше его магнитное сопротивление и магнитное напряжение, составляющее основную часть МДС магнитной цепи всей машины. Поэтому уменьшение зазора приводит к соответственному уменьшению МДС магнитной цепи и намагничивающего тока двигателя, благодаря чему возрастает его $\cos\varphi$ и уменьшаются потери в меди обмотки статора. Но чрезмерное уменьшение δ приводит к возрастанию амплитуды пульсаций индукции в воздушном зазоре и, как следствие этого, к увеличению поверхностных и пульсационных потерь. Поэтому КПД двигателей с очень малыми зазорами не улучшается, а часто даже становится меньше.

В современных асинхронных двигателях зазор выбирают исходя из минимума суммарных потерь. Так как при увеличении зазора потери в меди возрастают, а поверхностные и пульсационные уменьшаются, то существует оптимальное соотношение между параметрами, при котором сумма потерь будет наименьшей.

Выбранный по приведенным ниже рекомендациям воздушный зазор обычно превышает минимально допустимый по механическим условиям. Однако все же необходимо провести механический расчет вала проектируемого двигателя. Прогиб вала не должен быть больше 10 % воздушного зазора.

Информационное окно № 3.1
Расчет размеров зубцовой зоны ротора. Ввод исходных данных

Число, месяц, год	...?
Ваши фамилия, инициалы	...?
Группа	...?
Руководитель, должность, звание, фамилия, инициалы	...?

Введите данные технического задания на проектирование асинхронного двигателя:

1. Тип двигателя	Асинхронный с короткозамкнутым ротором, обмотка ротора «беличья клетка» (заливка алюминием)
2. Назначение	Общего исполнения или взрывозащищенный
3. Номинальный режим работы	$S1$
4. Номинальная мощность	$P_{2н}$=... кВт
5. Номинальное напряжеиие	Y/Δ,... В
6. Число полюсов	$2p$ = ...
7. Базисная частота	$f_{1н}$=... Гц
8. Частоты сети, при которых рассчитываются рабочие характеристики двнгателя	f_1=... Гц
9. Закон изменения напряжения или ЭДС статора в зависимости от частоты	$U_1/U_{1н}$=... $E_1/E_{1н}$=...
10. Степень защиты от воздействия окружающей среды	*IP*...
11. Способ охлаждения	*IC*...
12. Исполнение по способу монтажа	*IM*...
13. Климатические условия	....
14. Класс нагревостойкости изоляции	*F*
15. Маркировка взрывозащиты	......

Введите исходные данные, необходимые для выполнения третьего фрагмента:

1. Высота оси вращения	h = ... мм
2. Число пазов ротора	Z_2 = ... паз
3. Расчетная длина воздушного зазора	l_δ = ... м
4. Внутренний диаметр статора	D = ... м
5. Наружный диаметр статора	D_a = ... м
6. Предварительное значеиие номинального фазного тока статора	$I_{1н.пред.}$ = ... А
7. Чнсло витков в фазе статора	W_1 = ... вит
8. Обмоточный коэффициент обмоткн статора	$K_{об1}$ = ...
9. Предварительное значение коэффнциента мощности	$\cos\varphi_{н\ пред}$ = ...
10. Расчетное значение индукции в воздушном зазоре	B_δ = ... Тл
11. Расчетное значение магиитного потока	Ф = ... Вб

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 3.1. Нет — информ. окно № 3.2?).

Информационное окно № 3.2
Выбор величины воздушного зазора

По рис. 3.1 определите значение воздушного зазора.

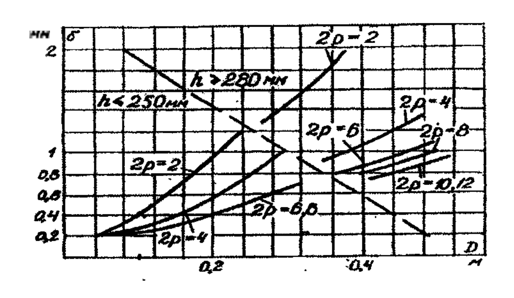


Рис. 3.1. К выбору воздушиого зазора в асинхронных двигателях

Необходимая для принятия решения информация:

— число полюсов $2p$ = ...;

— высота вращения h = ... мм;

— внутренний диаметр статора D=...м.

Введите в ЭВМ значение воздушного зазора, округленное до ближайшего числа из ряда: 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; и т. д.

δ = ...? мм

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 3.2. Нет — формулы (3.1) и (3.2) информ. окно № 3.3?).

Внешний диаметр ротора, м

$$D_2 = D - 2\delta \cdot 10^{-3}. \quad (3.1)$$

Зубцовое деление ротора, мм

$$t_2 = \pi D_2 \cdot 10^3 / Z_2. \quad (3.2)$$

Информационное окно № 3.3
Расчет внутреннего диаметра сердечника ротора

Характеристика ротора:

- короткозамкнутый;
- обмотка литая алюминиевая, типа «беличья клетка»;
- пазы ротора грушевидные закрытые или полузакрытые без скоса;
- зубцы ротора с параллельными гранями;
- сердечник ротора выполнен без аксиальных и радиальных каналов с непосредственной посадкой на гладкий вал без шпонки.

Учитывая тяжелые условия работы взрывозащищенных двигателей, крепление роторов на валу выполняется более надежным: на шпонках с приваркой.

Введите значение коэффициента $K_в$ для расчета внутреннего диаметра сердечника ротора (диаметра вала) (табл. 3.1).

Необходимая для принятия решения информация:

- высота оси вращения $h = \dots$ мм;
- число полюсов $2p = \dots$

$K_в = \dots ?$

Таблица 3.1

Значения коэффициента K_B

h, мм	50—63	71—250	280—355	
$2p$	2—6	2—8	2	4—12
K_B	0,19	0,23	0,22	0,23

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 3.3. Нет — формула (3.3), информ. окио № 3.4?).

Внутренний диаметр сердечника ротора (D_j), диаметр вала ($D_в$)

$$D_j = D_в = K_в \cdot D_a. \quad (3.3)$$

Информационное окно № 3.4
Расчет предварительного сечения стержня обмотки ротора

Для расчета предварительного сечения стержня ротора введите предварительное значение плотности тока в стержне.

Необходимая для принятия решения информация:

- степень защиты IP...
- плотность тока в стержнях ротора:

при степени защиты IP44, IP54

$J_{2.пред.} = 2{,}5–3{,}5$ А/мм^2;

при степени защиты IP23

$J_{2.пред.} = 2{,}8–4{,}0$ А/мм^2.

$J_{2.пред.} = \dots ?$ А/мм^2

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 3.4. Нет — формулы (3.4)—(3.7) информ. окно № 3.5?).

Коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания

$$K_I = 0{,}2 + 0{,}8\cos\varphi_{\text{н пред}}. \tag{3.4}$$

Коэффициент приведения тока ротора

$$\nu_I = \frac{2m_1 \cdot W_1 k_{\text{об}1}}{Z_2}. \tag{3.5}$$

Предварительное значение номинального фазного тока ротора, А

$$I_{2\text{н пред}} = K_I \cdot \nu_1 \cdot I_{1\text{н пред}}. \tag{3.6}$$

Предварительное значение сечения стержня обмотки ротора, А/мм^2

$$q_{c.\text{пред}} = I_{2\text{н пред}} / J_{2\text{ пред}}. \tag{3.7}$$

Информационное окно № 3.5
Расчет предварительного значения ширины зубца ротора

Для нахождения предварительного значения ширины зубца ротора введите предварительное значение индукции в зубцах ротора (табл. 3.2).

$B_{Z(2)\text{пред.}}$=…? Тл

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 3.5. Нет — формула (3.8), информ. окно № 3.6?).

Таблица 3.2

Допустимые значения индукции на различных участках магнитной цепи

Участок магнитной цепи	Обозначение	Степень защиты							
		IP44, IP54				IP23			
	Число полюсов 2p	2	4	6	8	2	4	6	8
Ярмо статора, Тл	$B_{a.min}$—$B_{a.max}$	1,4—1,6			1,15—1,35	1,45—1,6			1,2—1,4
Зубцы статора при постоянном сечении, Тл	$B_{z1.min}$—$B_{z1.max}$	1,6—1,9				1,8—2,05	1,7—1,95		
Ярмо короткозамкнутого ротора, Тл	B_j	$\leqslant$1,45	$\leqslant$1,4	$\leqslant$1,2	$\leqslant$1,0	$\leqslant$1,55	$\leqslant$1,5	$\leqslant$1,3	$\leqslant$1,1
Зубцы ротора при постоянном сечении, Тл	$B_{z2.min}$—$B_{z2.max}$	1,7—1,95				1,75—2,0			

Предварительное значение ширины зубца ротора, мм

$$b_{Z(2)\text{пред}} = \frac{B_\delta \cdot t_2}{k_c \cdot B_{Z(2)\text{пред}}} = \frac{B_\delta \cdot t_2}{0,97 B_{Z(2)\text{пред}}}, \tag{3.8}$$

где k_c = 0,97 — коэффициент заполнеиия пакета сердечника ротора сталью при толщине листа 0,5 мм и нзоляции посредством оксидирования.

Информационное окно № 3.6
Выбор формы паза ротора

Выберите форму паза ротора.

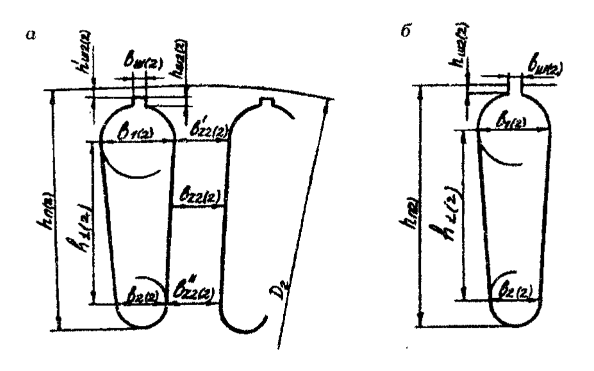


Рис. 3.2. Грушевидные пазы короткозамкнутого ротора:
а — закрытый; *б* — полузакрытый

Необходимая для прннятия решения ннформация:

— высота оси вращения h = ... мм;

— при высоте оси вращения h = 160—250 мм применяются трапецеидальные (грушевидные) закрытые пазы (рис. 3.2, а), (идентификатор формы паза 3).

— при высоте оси вращения h < 160 мм применяются трапецеидальные (грушевидные) полузакрытые пазы (рис. 3.2, *б*), (идентификатор формы паза 4).

Идентификатор формы паза…?

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 3.6. Нет — информ. окно № 3.7?).

Информационное окно № 3.7
Расчет геометрических размеров зубцовой зоны ротора

Введите известные размеры паза ротора.

Необходимая для принятия решения информация:

- высота оси вращения $h = \ldots$мм;
- число полюсов $2p = \ldots$;
- идентификатор формы паза ротора …;
- закрытый трапецеидальный паз ротора (см. рис. 3.2, *а*),

(идентификатор 3):

- ширина шлица $b_{ш(2)} = 1{,}5$ мм;
- высота шлица $h_{ш(2)} = 0{,}7$ мм;
- высота перемычки над пазом:
- $h'_{ш(2)} = 0{,}3$ мм, если $2p \geqslant 4$;
- $h'_{ш(2)} = 1{,}0$— 1,5 мм, если $2p = 2$.

- полузакрытый трапецеидальный паз ротора (см. рис. 3.2, *б*), (идентификатор 4):

ширина прорези: $b_{ш(2)} = 1{,}0$ мм, если $h \leqslant 100$ мм;

$b_{ш(2)} = 1{,}5$ мм, если $h = 112$–132 мм;

глубина прорези: $h_{ш(2)} = 0{,}5$ мм, если $h \leqslant 100$ мм;

$h_{ш(2)} = 0{,}75$ мм, если $h = 112$–132 мм;

высота перемычки над пазом $h'_{ш(2)} = 0$.

Размеры паза ротора рассчитывают, исходя из требуемого по плотности тока сечения стержня, допустимых значений индукций в зубцах и ярме ротора (см. табл. 3.2) и условия постоянства ширины зубца, т. е. параллельности его боковых граней.

$b_{ш(2)}$=…? мм

$h_{ш(2)}$=…? мм

$h'_{ш(2)}$=…? мм

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 3.7. Нет — формулы (3.9)—(3.18), информ. окно № 3.8?).

Диаметр закругления верхней части паза ротора, мм:

$$b_{1(2)} = \frac{\pi (D_2 \cdot 10^3 - 2h_{ш(2)} - 2h'_{ш(2)}) - Z_2 \cdot b_{Z(2)пред}}{\pi + Z_2} \quad (3.9)$$

(округлить до десятых долей миллиметра).

Проверка правильности выбора предварительного значения плотности тока в стержне ротора:

$$\Delta q_c = b_{1(2)}^2 \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4q_{с\ пред.}. \quad (3.10)$$

При правильном выборе предварительного значения плотности тока в стержне ротора $\Delta q_c > 0$.

Если $\Delta q_c < 0$, то необходимо увеличить предварительное значение плотности тока в стержне ротора, не превышая рекомендуемого верхнего предела (см. информ. окно № 3.4).

Диаметр закругления нижней части паза ротора, мм:

$$b_{2(2)} = \sqrt{\frac{b_{1(2)}^2 \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4q_{с.пред.}}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} \quad (3.11)$$

(округлить до десятых долей миллиметра).

Если при расчете по формуле (3.11) получается отрицательное подкоренное выражение и ЭВМ сигнализирует об ошибке расчета, то

необходимо увеличить величину предварительной плотности тока $J_{2\,пред}$, не превышая максимального значения.

Информационное окно № 3.8
Проверка правильности расчета геометрических размеров зубцовой зоны ротора

Высота оси вращения двигателя h = ...мм.

Диаметр закругления верхней части паза ротора $b_{1(2)}$ = ... мм.

Проверка правильности выбора предварительного значения плотности тока в стержне ротора Δq_c=... мм^2.

При правильном выборе плотности тока $\Delta q_c>0$. Если $\Delta q_c<0$, то необходимо увеличить предварительное значение плотности тока в стержне ротора, не превышая рекомендуемого верхнего предела (см. информ. окно № 3.4).

Диаметр закругления нижней части паза ротора $b_{2(2)}$ = ... мм.

Условия высококачественной заливки пазов ротора алюминием требуют, чтобы диаметр закругления нижней части паза ротора ($b_{2(2)}$) в двигателях с высотой оси вращения $h \leqslant 132$ мм был не менее 1,5 мм, а в двигателях с $h \geqslant 160$ мм — не менее 2,5 мм. Увеличить значение диаметра нижней части паза ротора ($b_{2(2)}$) можно путем увеличения предварительного значения и плотности тока в стержне ротора, не превышая рекомендуемого верхнего предела (см. информ. окно № 3.4).

Если рекомендуемым выше путем не удается скорректировать значение диаметра $b_{2(2)}$, то пользователь может ввести в расчет предельно допустимое значение диаметра $b_{2(2)}$, но при таком варианте расчета не удается сохранить параллельность граней зубцов ротора без коррекции значения индукции в зубцах ротора.

$\Delta q_c<0$—Да?
(информ. окно № 3.4.)

Если $h \leqslant 132$ мм и $b_{2(2)} < 1{,}5$ мм, то ввести $b_{2(2)} = 1{,}5$ мм
Если $h \geqslant 160$ мм и $b_{2(2)} < 2{,}5$ мм, то ввести $b_{2(2)} = 2{,}5$ мм
$b_{2(2)} = \ldots?$ мм

Если пользователь не вводит значение диаметра закругления нижней части паза ротора $b_{2(2)}$, то по умолчанию в дальнейшем расчете используется значение $b_{2(2)}$, вычисленное по формуле (3.11).

Корректировка расчета: (Да — информ. окно № 3.5. Нет — формулы (3.12)—(3.18), ннформ. окно № 3.9?).

Расстояние между центрами верхней и нижней окружностей паза ротора, мм:

$$h_{1(2)} = (b_{1(2)} - b_{2(2)}) \frac{Z_2}{2\pi} . \tag{3.12}$$

(округлить до десятых долей миллиметра).

Высота паза ротора, мм:

$$h_{\Pi(2)} = h_{1(2)} + 0{,}5 b_{1(2)} + 0{,}5 b_{2(2)} + h_{ш(2)} + h'_{ш(2)} . \tag{3.13}$$

Площадь сечения стержня ротора, мм^2:

$$q_c = \frac{\pi}{8}(b_{1(2)}^2 + b_{2(2)}^2) + 0{,}5(b_{1(2)} + b_{2(2)}) h_{1(2)} . \tag{3.14}$$

Проверка параллельности граней зубцов ротора, мм:

$$b'_{Z(2)} = \pi \left(\frac{D_2 \cdot 10^3 - 2(h_{ш(2)} + h'_{ш(2)}) - b_{1(2)}}{Z_2} \right) - b_{1(2)} ; \tag{3.15}$$

$$b''_{Z(2)} = \pi \left(\frac{D_2 \cdot 10^3 - 2h_{п(2)} + b_{2(2)}}{Z_2} \right) - b_{2(2)} . \tag{3.16}$$

Отклонение от параллельности граней, мм:

$$\Delta b_{Z(2)} = \left|b'_{Z(2)} - b''_{Z(2)}\right|. \quad (3.17)$$

Прн правильном конструировании

$$\left|\Delta b_{Z(2)}\right| \leq 0{,}5 \text{ мм}. \quad (3.18)$$

Информационное окно № 3.9
Геометрические размеры зубцовой зоны ротора

Диаметр закругления верхней части паза ротора

$$b_{1(2)} = \ldots \text{ мм}.$$

Диаметр закругления нижней части паза ротора

$$b_{2(2)} = \ldots \text{ мм}.$$

Расстояние между центрами верхней и нижней окружностей паза

$$h_{1(2)} = \ldots \text{ мм}.$$

Высота паза ротора

$$h_{п(2)} = \ldots \text{ мм}.$$

Площадь сечения стержня ротора

$$q_c = \ldots \text{ мм}^2.$$

Отклонение от параллельности граней зубцов ротора

$$\Delta b_{Z(2)} = \ldots \text{ мм}.$$

Если $\Delta b_{Z(2)} > 0{,}5$ мм, то необходимо сделать следующие корректировки расчета:

1. Увеличить предварительное значение индукции в зубцах ротора $B_{Z(2)пред}$ (см. табл. 3.2), не превышая предельно допустимого значения (информ. окно № 3.5).
2. Увеличить плотность тока в стержне ротора $J_{2.пред.}$, ие превышая предельно допустимого значения (ннформ. окно № 3.4).

3. Увеличить одновременно $B_{Z(2)пред}$ и $J_{2.пред}$. (информ. окно № 3.4 и 3.5).

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 3.4, № 3.5. Нет — формулы (3.19)–(3.22), информ. окно № 3.10?).

Ширина зубца ротора, мм:

$$b_{Z(2)} = 0{,}5(b'_{Z(2)} + b''_{Z(2)}). \quad (3.19)$$

Расчетная высота зубца ротора, мм:

$$h_{Z(2)} = h_{п(2)} - 0{,}1b_{2(2)}. \quad (3.20)$$

Расчетное значение индукции в зубцах ротора, Тл:

$$B_{Z(2)} = \frac{B_\delta \cdot t_2}{k_c \ b_{Z(2)}} = \frac{B_\delta \cdot t_2}{0{,}97b_{Z(2)}}. \quad (3.21)$$

Проверка допустимостн величины расчетного значения индукции в зубцах ротора, Тл:

$$\Delta B_{Z(2)} = 2{,}1 - B_{Z(2)}. \quad (3.22)$$

При правильном расчете $\Delta B_{Z(2)} \geq 0$.

Информационное окно № 3.10
Проверка правильности расчета размеров зубца ротора

Ширина зубца ротора

$$b_{Z(2)} = \ldots \text{ мм.}$$

Расчетная высота зубца ротора

$$h_{Z(2)} = \ldots \text{ мм.}$$

Расчетное значеиие индукции в зубцах ротора

$$B_{Z(2)} = \ldots \text{ Тл.}$$

Проверка допустимости расчетного значения индукции в зубцах ротора

$$\Delta B_{Z(2)} = \ldots \text{ Тл.}$$

При правильном расчете

$$\Delta B_{Z(2)} \geqslant 0.$$

Для уменьшения значения индукции в зубцах ротора необходимо:

1. Увеличить плотность тока в стержне $J_{2\,\text{пред}}$, не превышая максимального значения для данной степени защиты (информ. окно № 3.4).
2. Увеличить расчетную длину воздушного зазора l_δ (первый фрагмент программы).
3. Увеличить наружный диаметр статора D_a, т. е. высоту оси вращения h (первый фрагмент программы).

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 3.4 или первый фрагмент программы. Нет — информ. окно № 3.11?).

Информационное окно № 3.11
Расчет ярма ротора

Введите значение максимальной индукции в ярме короткозамкнутого ротора (см. табл. 3.2).

Необходимая для принятия решения информация:

- степень защиты IP…
- число полюсов $2p = \ldots$

$$B_{j\max} = \ldots ? \text{ Тл}$$

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 3.11. Нет — формулы (3.23)–(3.27), информ. окно № 3.12?).

Условная высота ярма ротора, м:

$$\Delta D = 0{,}75\left(\frac{D_2}{2} - h_{п(2)} \cdot 10^{-3}\right). \qquad (3.23)$$

Если $2p = 2$ или $2p = 4$ и $D_j > \Delta D$, то расчетная высота ярма ротора, мм:

$$h'_j = \frac{2 + \frac{2p}{2}}{3{,}2 \cdot \frac{2p}{2}}\left(\frac{D_2 \cdot 10^3}{2} - h_{п(2)}\right). \qquad (3.24)$$

Если $2p = 4$ и $D_j < \Delta D$ или если $2p > 4$, то расчетная высота ярма ротора, мм:

$$h'_j = 0{,}5(D_2 - D_j) \cdot 10^3 - h_{п(2)} \qquad (3.25)$$

Индукция в ярме ротора, Тл:

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot k_c \cdot h'_j \cdot 10^{-3} \cdot l_\delta} = \frac{\Phi}{1{,}94 \cdot 10^{-3} \cdot h'_j \cdot l_\delta}. \qquad (3.26)$$

Проверка допустимости индукции в ярме ротора, Тл:

$$\Delta B_j = B_{j\max} - B_j. \qquad (3.27)$$

При правильном расчете $\Delta B_j \geqslant 0$.

Информационное окно № 3.12
Проверка правильности расчета размеров ярма ротора

Расчетная высота ярма ротора

$$h'_j = \ldots\text{мм}.$$

Индукция в ярме ротора

$$B_j = \ldots\text{Тл}.$$

Проверка допустимости значения индукции в ярме ротора

$$\Delta B_j = \ldots \text{Тл}.$$

При правильном расчете

$$\Delta B_j \ge 0.$$

Для уменьшения значения индукции в ярме ротора необходимо:

1. Увеличить плотность тока в стержне $J_{2\text{н.пред}}$, не превышая максимального значения для данной степени защиты (информ. окно № 3.4).
2. Увеличить расчетную длину воздушного зазора l_δ (первый фрагмент программы).
3. Увеличить наружный диаметр статора D_a ,т. е. высоту оси вращения h (первый фрагмент программы).

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 3.4. Нет — формулы (3.28)—(3.30) и информ. окно № 3.13?).

Плотность тока в стержне ротора, А/мм^2:

$$J_2 = I_{2\text{н.пред}} / q_c . \qquad (3.28)$$

Проверка допустимости значения плотности тока в стержне:

Если степень защиты IP44, IP54, то

$$\Delta J_2 = 3{,}5 - J_2 . \qquad (3.29)$$

Если степень защиты IP23, то

$$\Delta J_2 = 4 - J_2 . \qquad (3.30)$$

При правильном расчете $\Delta J_2 \ge 0$.

Информационное окно № 3.13
Расчет геометрических размеров замыкающих колец

Плотность тока в стержне ротора

$$J_2 = ...\text{А}/\text{мм}^2.$$

Проверка допустимости плотности тока в стержне ротора

$$\Delta J_2 = ...\text{А}/\text{мм}^2.$$

При правильном расчете

$$\Delta J_2 \geq 0.$$

Уменьшить значение плотности тока в стержне ротора можно путем увеличения индукции в зубцах ротора $B_{Z(2)\text{пред}}$, которая не должна превышать 2,1 Тл (информ. окно № 3.5).

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 3.5. Нет — формулы (3.31)—(3.37) и информ. окно № 3.14?).

Плотность тока в замыкающих кольцах короткозамкнутого ротора, А/мм^2

$$J_{\text{кл}} = 0{,}85 J_2. \tag{3.31}$$

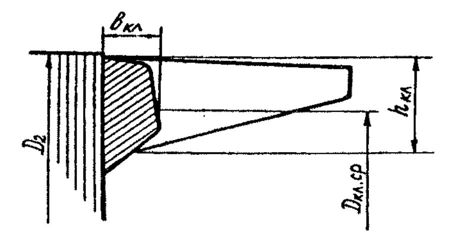


Рис. 3.3. Размеры с замыкающих колец короткозамкнутого ротора с литой обмоткой

Отношение тока в стержне к току в замыкающем кольце, рад.:

$$\Delta = 2\sin\left(\frac{2p\cdot\pi}{2Z_2}\right). \tag{3.32}$$

Ток в замыкающем кольце, А:

$$I_{кл} = I_{2н\,пред.} / \Delta \,. \qquad (3.33)$$

Площадь поперечного сечения замыкающего кольца, мм^2:

$$q_{кл} = I_{кл} / J_{кл} \,. \qquad (3.34)$$

Высота сечения замыкающего кольца, мм (рис. 3.3):

$$h_{кл} = 1{,}25 h_{п(2)} \,. \qquad (3.35)$$

Ширина замыкающего кольца, мм (см. рис. 3.3):

$$b_{кл} = q_{кл} / h_{кл} \,. \qquad (3.36)$$

Средний диаметр замыкающего кольца, м (см. рис. 3.3):

$$D_{кл.ср} = D_2 - h_{кл} \cdot 10^{-3} \,. \qquad (3.37)$$

Проверка правильности расчета геометрических размеров зубцовой зоны ротора.

$$t'_{2пр} = \frac{\pi\,(D_2 10^3 - 2(h_{ш(2)} + h'_{ш(2)}) - b_{1(2)})}{Z_2}, \qquad (3.38)$$

$$t''_{2пр} = b'_{Z(2)} + b_{1(2)}, \qquad (3.39)$$

$$\Delta t_{2пр} = t'_{2пр} - t''_{2пр} \qquad (3.40)$$

При правильном расчете $\Delta t_{2пр} = 0$.

Информационное окно № 3.14
Выбор количества и размеров вентиляционных лопаток

Площадь поперечного сечения замыкающего кольца

$$q_{кл} = \ldots мм^2 \,.$$

Высота сечения замыкающего кольца (см. рис. 3.3)

$$h_{кл} = ...мм.$$

Ширина замыкающего кольца (см. рис. 3.3)

$$b_{кл} = ...мм.$$

Средний диаметр замыкающего кольца (см. рис. 3.3)

$$D_{кл.ср.} = ...м.$$

Введите данные о количестве и размерах вентиляционных лопаток ротора (рис. 3.4, а, б; табл. 3.3).

Необходимая для принятия решения информация:

- высота оси вращения $h = ...$мм;
- число полюсов $2p = ...$

Количество вентиляционных лопаток ротора

$$N_{в.л} = ...?$$

Таблица 3.3

Количество и размеры вентиляционных лопаток ротора

Высота вращения h, мм	Число полюсов $2p$								
	2			4—6			8		
	$N_{в.л.}$	$l_{в.л}$, мм	$h_{в.л.}$, мм	$N_{в.л.}$	$l_{в.л.}$, мм	$h_{в.л.}$, мм	$N_{в.л}$	$l_{в.л.}$, мм	$h_{в.л}$, мм
50—63	6	20	10	6	20	10	—	—	—
71—100	7	35	12	9	30	15	9	30	15
112—160	9	40	20	11	40	22	11	35	25
180	10	60	25	12	60	30	12	50	32
200—250	12	75	28	14	70	35	14	65	40
280—315	17	95	30	22	90	40	22	82	48

Длина вентиляционной лопатки

$$l_{в.л.} = ... ?\ мм$$

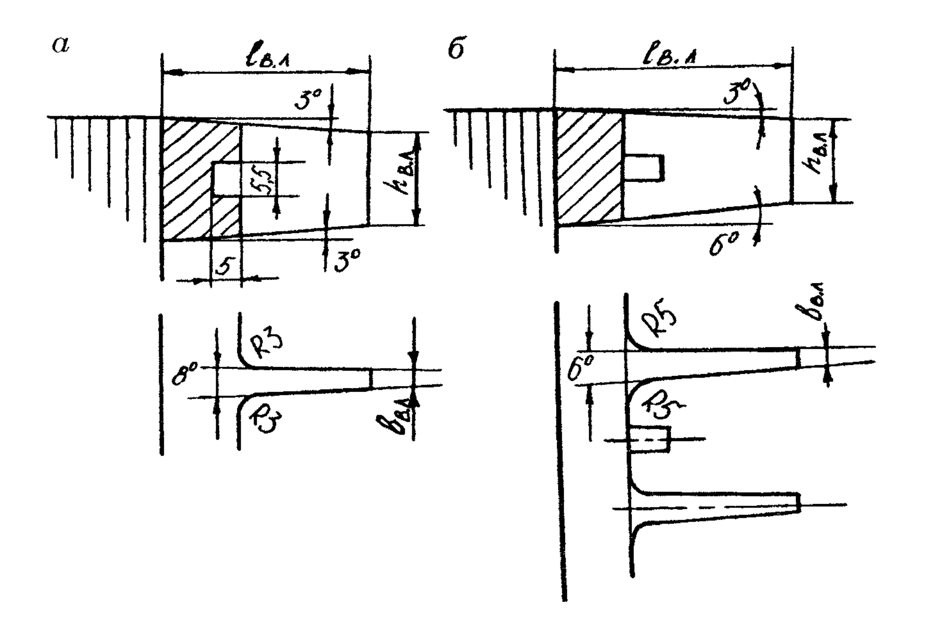


Рис. 3.4. Вентиляционные лопатки короткозамкнутого ротора:
а – h = 50÷132 мм; *б* – h = 160÷250 мм

При конструировании асинхронных двигателей длина вентиляционной лопатки принимается несколько меньше длины вылета лобовой части обмотки статора.

Ширина конца вентиляционной лопатки

$h_{в.л}$ = ...? мм

Толщиина конца вентиляционной лопатки лежит в пределах $b_{в.л}$=2÷5 мм.

$b_{в.л}$ =...? мм

Корректировка расчета (Да – информ. окно № 3.14. Нет – информ. окно № 3.15?).

Информационное окно № 3.15
Расчет размеров зубцовой зоны ротора закончен.
Проверка введенных данных

Число, месяц, год	...
Ваши фамилия, инициалы	...
Группа	...
Руководитель, должность, звание, фамилия, инициалы	...

Данные технического задания на проектирование асинхронного двигателя:

1. Тип двигателя	Асинхронный с короткозамкнутым ротором, обмотка ротора «беличья клетка» (заливка алюминием)
2. Назначение	Общего исполнения или взрывозащищенный
3. Номинальный режим работы	$S1$
4. Номинальная мощность	$P_{2н}$=... кВт
5. Номинальное напряжение	Y/Δ,... В
6. Число полюсов	$2p$ = ...
7. Базисная частота	$f_{1н}$=... Гц
8. Частоты сети, при которых рассчитываются рабочие характеристики двигателя	f_1=... Гц
9. Закон изменения напряжения или ЭДС статора в зависимости от частоты	$U_1/U_{1н}$=... $E_1/E_{1н}$=...
10. Степень защиты от воздействия окружающей среды	*IP*...
11. Способ охлаждения	*IC*...
12. Исполнение по способу монтажа	*IM*...
13. Климатические условия	....
14. Класс нагревостойкости изоляции	*F*
15. Маркировка взрывозащиты	......

Проверьте данные, введенные в процессе расчета:

1. Высота оси вращения	h = ... мм
2. Число пазов ротора	Z_2 = ... паз
3. Расчетная длина воздушного зазора	l_δ = ... м
4. Внутренний диаметр статора	D = ... м
5. Наружный диаметр статора	D_a = ... м
6. Предварительное значеие номинального фазного тока статора	$I_{1н\ пред}$ = ... А
7. Число витков в фазе статора	W_1 = ... вит
8. Обмоточный коэффициент обмотки статора	$k_{об1}$ = ...
9. Предварительное значение коэффициента мощности	$\cos \varphi_{н.пред}$ = ...
10. Расчетное значение индукции в воздушном зазоре	B_δ = ... Тл
11. Расчетное значение магнитного потока	Φ = ... Вб
12. Значение воздушного зазора	δ =...мм
13. Значение коэффициента $K_в$ для расчета внутреннего диаметра сердечника ротора	$K_в$
14. Предварительное значение плотности тока в стержне ротора	$J_{2\ пред}$=...А/мм^2
15. Предварительное значение индукции в зубцах ротора	$B_{Z2пред}$=...Тл
16. Идентификатор формы паза ротора	...
17. Ширина шлица	$b_{ш(2)}$=...мм
18. Высота шлица	$h_{ш(2)}$=...мм
19. Высота перемычки над пазом	$h'_{ш(2)}$=...мм
20. Введенное значение диаметра закругления нижней части паза ротора (вводится только в том случае, когда расчетное значение диаметра получается меньше минимальное допустимой величины)	$b_{2(2)}$=...
21. Максимальное значение индукции в ярме короткозамкнутого ротора	B_{jmax}=...Тл
22. Количество вентиляционных лопаток ротора	$N_{в.л}$=...
23. Длина вентиляционной лопатки	$l_{в.л}$=...мм
24. Ширина конца вентиляционной лопатки	$h_{в.л}$=...мм
25. Толщина конца вентиляционной лопатки	$b_{в.л}$=... мм

Просмотр введенных данных закончен.

Повторить: (Да — информ. окно № 3.15?).

Результаты расчета: (Да — информ. окно № 3.16?).

Информационное окно № 3.16
Результаты расчета зубцовой зоны ротора

$D_2 = \ldots$ м (3.1)

$t_2 = \ldots$мм (3.2)

$D_j = \ldots$ (3.3)

$K_I = \ldots$ (3.4)

$\nu_I = \ldots$ (3.5)

$I_{2н.пред}=\ldots$А (3.6)

$q_{с\ пред} = \ldots$мм^2 (3.7)

$b_{Z(2)пред} = \ldots$мм (3.8)

$b_{1(2)} = \ldots$мм (3.9)

$\Delta q_c= \ldots$мм (3.10)

($\Delta q_c>0$)

$b_{2(2)} = \ldots$мм (3.11)

$h_{1(2)} =\ldots$ мм (3.12)

$h_{п(2)} =\ldots$ мм (3.13)

$q_c =\ldots$мм^2 (3.14)

$b'_{Z(2)} = \ldots$ мм (3.15)

$b''_{Z(2)} = \ldots$мм (3.16)

$\Delta b_{Z(2)} = \ldots$мм (3.17)

$|\Delta b_{Z(2)}| \leqslant 0{,}5$ мм (3.18)

$b_{Z(2)} = \ldots$мм (3.19)

$h_{Z(2)} = \ldots$мм (3.20)

$B_{Z(2)} = \ldots$Тл (3.21)

$B_{Z(2)} = \ldots$Тл (3.22)

($B_{Z(2)} \geqslant 0$)

$\Delta D = \ldots$м (3.23)

$h'_j = \ldots$мм (3.24)

(если $2p=2$ или $2p=4$ и $D_j>\Delta D$)

$h'_j = \ldots$мм (3.25)

(если $2p=4$ и $D_j<\Delta D$ или $2p>4$)

$B_j =\ldots$Тл (3.26)

$\Delta B_j=\ldots$Тл (3.27)

($\Delta B_j \geqslant 0$)

$J_2=\ldots$А/мм^2 (3.28)

$\Delta J_2=\ldots$А/мм^2 (3.29)

($\Delta J_2 \geqslant 0$, если IP44)

$\Delta J_2=\ldots$А/мм^2 (3.30)

($\Delta J_2 \geq 0$, если IP23)

$J_{кл}$=...А/мм^2 (3.31)

Δ=... (3.32)

$I_{кл}$= ...А (3.33)

$q_{кл}$ ...мм^2 (3.34)

$h_{кл}$=...мм (3.35)

$b_{кл}$=... мм (3.36)

$D_{кл.ср.}$=...м (3.37)

$t'_{2пр}$=....мм (3.38)

$t''_{2пр}$=....мм (3.39)

$\Delta t'_{2пр}$=....мм (3.40)

($\Delta t'_{2пр}=0$).

Просмотр результатов расчета закончен.

Повторить: (Да – информ. окно № 3.16?).

Печать: (Да – информ. окно № 3.15 и 3.16?).

4. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НА ЭВМ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ
(четвертый фрагмент программы)

Для расчета магнитной цепи используется уравнение полного тока для замкнутого контура

$$F_ц = \oint \vec{H}\, d\vec{l}.$$

Интеграл берется по контуру вдоль средней магнитной силовой линии. При решении задачи круговой интеграл заменяется суммой магнитных напряжений (суммой МДС) на участках магнитной цепи (рис. 4.1)

$$F_Ц = \sum_{i=1}^{n} H_i l_i,$$

где $F_Ц$ — магнитодвижущая сила (МДС) вдоль замкнутого контура (скалярная величина), равная круговому интегралу напряженности магнитного поля вдоль рассматриваемого замкнутого контура и также равная полному току, охватываемому этим контуром;

n — число участков, на которые подразделена магнитная цепь;

l_i — длина средней магнитной силовой линии в пределах каждого из участков,

H_i — расчетное значение напряженности магнитиого поля на i-м участке.

Расчет магнитной цепи асинхронного двигателя ведется на два полюса. При этом магнитная цепь разбивается на следующие участки: два воздушных зазора, два зубца статора, два зубца ротора, ярмо статора и ярмо ротора.

Суть расчета заключается в том, чтобы по известному магнитному потоку и известным геометрическим размерам всех участков магнитной цепи определить МДС и затем намагничивающий ток (реактивную составляющую тока холостого хода).

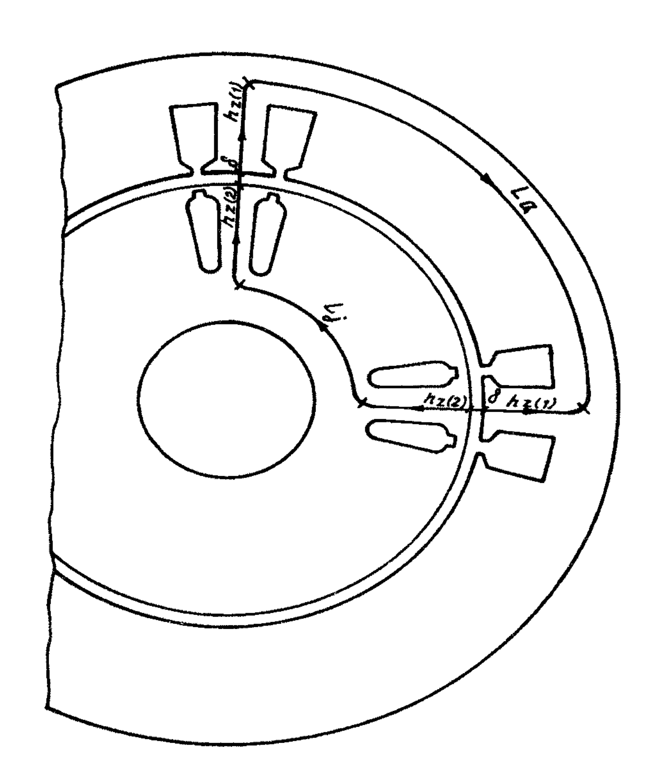


Рис. 4.1. Расчетная схема магнитной цепи асинхронного двигателя с $2p = 4$

Информационное окно № 4.1
Расчет магнитной цепи асинхронного двигателя. Ввод исходных данных

Число, месяц, год	...?
Ваши фамилия, инициалы	...?
Группа	...?
Руководитель, должность, звание, фамилия, инициалы	...?

Введите данные технического задания на проектирование асинхронного двигателя:

1. Тип двигателя	Асинхронный с короткозамкнутым ротором, обмотка ротора «беличья клетка» (заливка алюминием)
2. Назначение	Общего исполнеиия или взрывозащищенный
3. Номинальный режим работы	$S1$
4. Номинальная мощность	$P_{2н}$=... кВт
5. Номинальное иапряжение	Y/Δ,... В
6. Число полюсов	$2p$ = ...
7. Базисная частота	$f_{1н}$=... Гц
8. Частоты сети, при которых рассчитываются рабочие характеристики двигателя	f_1=... Гц
9. Закон изменения иапряжения или ЭДС статора в зависимости от частоты	$U_1/U_{1н}$=... $E_1/E_{1н}$=...
10. Степень защиты от воздействия окружающей среды	IP...
11. Способ охлаждения	IC...
12. Исполнение по способу моитажа	IM...
13. Климатические условия	....
14. Класс иагревостойкости изоляции	F
15. Маркировка взрывозащиты	......

Введите исходные данные, необходимые для расчета четвертого фрагмента программы

1. Высота оси вращения	h = ...? мм
2. Наружный диаметр статора	D_a = ...? м
3. Внутренний диаметр статора	D = ... ? м
4. Внешний диаметр ротора	D_2 = ...? м
5. Внутренний диаметр ротора (диаметр вала)	D_j = ...? м
6. Величина воздушного зазора	δ = ...? мм
7. Предварительное зиачение номинального фазного тока статора	$I_{1н.пред}$ = ...? А
8. Магнитный поток	Φ = ...? Вб
9. Расчетное значение индукции в воздушном зазоре	B_δ =...? Тл
10. Расчетная длина воздушного зазора	l_δ = ...? м

11. Чнсло витков в фазе статора	W_1 = ...? вит
12. Обмоточиый коэффициент обмотки статора	$k_{об1}$= ...?
Геометрические размеры зубцовой зоны статора (все размеры в мм)	
13. Зубцовое деление	t_1 = ...? мм
14. Ширина шлица паза	$b_{ш(1)}$=...? мм
15. Высота паза	$h_{п(1)}$ =...? мм
16. Верхняя ширина паза	$b_{1(1)}$ =...? мм
17. Нижняя ширина паза	$b_{2(1)}$ =...? мм
18. Высота зубца	$h_{Z(1)}$ =...? мм
19. Средняя ширина зубца	$b_{Z(1)}$ =...? мм
20. Отклонеиие от параллельности боковых граней зубца (из данных проверок правильности расчета)($\Delta b_{Z(1)} \leq$0,5 мм)	$\Delta b_{Z(1)}$=...? мм
Геометрические размеры зубцовой зоны ротора (все размеры в мм):	
21. Идентификатор формы паза	...
22. Зубцовое деление	$t_{(2)}$=...? мм
23. Ширина шлица (прорези) паза ротора	$b_{ш(2)}$ =...? мм
24. Высота паза	$h_{п(2)}$ =...? мм
25. Диаметр закругления верхней части паза	$b_{1(2)}$ =...? мм
26. Диаметр закругления нижней части паза	$b_{2(2)}$ =...? мм
27. Высота зубца	$h_{Z(2)}$ =...? мм
28. Ширина верхней части зубца	$b'_{Z(2)}$ =...? мм
29. Ширииа нижней части зубца	$b''_{Z(2)}$ =...? мм
30. Отклонение от параллельности боковых граней зубца	$\Delta b_{Z(2)}$ =...? мм

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 4.1. Нет — информ. окно № 4.2?)

Информационное окно № 4.2
Расчетная схема магнитной цепи

Начертите в записке курсового проекта магнитную цепь рассчитываемого асинхронного двигателя и укажите, на какие участки она подразделяется при расчете. Кратко опишите суть расчета магнитиой цепи.

Введите марку электротехиической стали (табл. 4.1).

Необходимая для приинятия решения информация:

— высота оси вращения h = ...мм.

Марка электротехнической стали …?

Таблица 4.1

Марки электротехнической стали

Высота оси вращеиия h, мм	Марка стали
45–250	2013
160–250	2212
71–250	2214
280–355	2312

Введите условную величину ширины шлица (прорези) паза ротора ($b'_{ш(2)}$).

Необходимая информация:

$b'_{ш(2)}=0$, если паз ротора закрытый (идентификатор 3);

$b'_{ш(2)}=b_{ш(2)}$, если паз ротора полузакрытый (идентификатор 4).

$b'_{ш(2)}=\ldots$? мм

Корректировка расчета (Да – информ. окно № 4.2. Нет – формулы (4.1)–(4.9), информ. окно № 4.3?)

Коэффициент воздушного зазора k_δ, учитывающий увеличение магнитного сопротивления и МДС воздушного зазора из-за зубчатых поверхностей статора и ротора, рассчитывается по формулам (4.1)–(4.5):

$$\gamma_1=\frac{(b_{ш(1)}/\delta)^2}{5+(b_{ш(1)}/\delta)}; \tag{4.1}$$

$$\gamma_2=\frac{(b'_{ш(2)}/\delta)^2}{5+(b'_{ш(2)}/\delta)}; \tag{4.2}$$

$$k_{\delta 1}=\frac{t_1}{t_1-\gamma_1\cdot\delta}; \tag{4.3}$$

$$k_{\delta 2}=\frac{t_2}{t_2-\gamma_2 \cdot \delta};\qquad (4.4)$$

$$k_\delta=k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2}.\qquad (4.5)$$

Магнитное напряжение (МДС) воздушного зазора, А:

$$F_\delta=2\left(\frac{1}{\mu_0}B_\delta \cdot \delta \cdot k_\delta\right)=1{,}59 \cdot 10^6 \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot 10^{-3} \cdot k_\delta=1{,}59 \cdot 10^3 \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_\delta,\qquad (4.6)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}=1{,}256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

Ширина паза статора $b_{п(1)}$ и значение коэффициента $k_{п(1)}$ на высоте зубца статора $h_{Z(X)} = 0{,}5\ h_{Z(1)}$ рассчитываются по формулам (4.7), (4.8):

$$b_{п(1)} = 0{,}5(b_{1(1)} + b_{2(1)});\qquad (4.7)$$

$$k_{п(1)} = \frac{b_{п(1)}}{k_c b_{Z(1)}} = \frac{b_{п(1)}}{0{,}97 b_{Z(1)}},\qquad (4.8)$$

где $k_c = 0{,}97$ — коэффициент заполнения пакета сталью.

Расчетное значение индукции в зубце статора, Тл:

$$B'_{Z(1)}=\frac{B_\delta \cdot t_1}{k_c \cdot B_{Z(1)}}=\frac{B_\delta \cdot t_1}{0{,}97 \cdot B_{Z(1)}}.\qquad (4.9)$$

Информационное окно № 4.3
Расчет действительного значения индукции в зубце статора

В программе используется методика расчета участка магнитной цепи зубцовой зоны статора для зубцов с параллельными боковыми гранями, когда $\Delta b_{Z(1)} \leqslant 0{,}5$ мм. Если это условие не выполняется, то необходимо скорректировать размеры паза статора таким образом, чтобы получить зубцы с параллельными боковыми гранями (второй фрагмент программы).

Если расчетное значение индукции в зубце статора $B'_{Z(1)}>1,8$ Тл, то необходимо учесть ответвление магнитного потока в паз статора и найти действительное значение индукции в зубце статора ($B_{Z(1)}$). Если $B'_{Z(1)} \leqslant 1,8$ Тл, то считают, что весь магнитный поток проходит по зубцу, и, следовательно, расчетное значение индукции равно действительному ($B'_{Z(1)}= B_{Z(1)}= B^{пр}_{Z(1)}$).

При $B'_{Z(1)}>1,8$ Тл действительное значение индукции в зубце статора $B_{Z(1)}$ находится методом итераций. При реализации этого метода вводится предполагаемое действительное значение индукции в зубце статора $B^{пр}_{Z(1)}$ и соответствующее ей значение напряженности магнитного поля $H_{Z(1)}$, которое находится по кривым намагничивания (табл. 4.2 и 4.3).

При первой итерации рекомендуется ввести предполагаемое действительное значение индукции в зубце статора на 0,05 Тл меньше расчетного значения ($B^{пр}_{Z(1)} = B'_{Z(1)} - 0,05$), если $B_{Z(1)}<2$ Тл, и на 0,1 Тл меньше расчетного значения ($B^{пр}_{Z(1)} = B'_{Z(1)} - 0,1$), если $B_{Z(1)} \geqslant 2$ Тл.

Верность предположения проверяется по уравнению

$$B_{Z(1)} = B'_{Z(1)} - \mu_0 H_{Z(1)} \cdot k_{п(1)},$$

где $H_{Z(1)}$ соответствует индукции $B^{пр}_{Z(1)}$.

Процесс ввода предполагаемых значений действительной индукции в зубце статора ведется до тех пор, пока не будет получен результат, Тл:

$$\left|B^{пр}_{Z(1)} - B_{Z(1)}\right| \leq 0,025.$$

При достижении этого результата процесс поиска заканчивается, и полученное значение индукции используется в дальнейшем расчете.

Проверьте данные, необходимые для применения метода итераций.

Отклонение от параллельности граней зубца статора

$$\Delta b_{Z(1)} = \dots \text{ мм.}$$

Достоверность расчета участка магнитной цепи зубцовой зоны статора обеспечивается только при $|\Delta b_{Z(1)}| \leqslant 0{,}5$ мм.

Введите предполагаемое значение действительной индукции в зубце статора и соответствующее ей значение напряженности магнитного поля.

Необходимая для принятия решения информация:

- расчетное значение индукции в зубце статора $B'_{Z(1)} = \dots$Тл (если расчетное значение индукции меньше или равно 1,8 Тл, то принять предполагаемое действительное значение индукции равным расчетному);
- марка стали ....;
- напряженность магнитного поля определить:

марка стали 2013 – (см. табл. 4.2);

марки стали 2213,2214 и 2312 – (см. табл. 4.3).

$B^{\text{пр}}_{Z(1)} = \dots$? Тл $H_{Z(1)} = \dots$?А..

Корректировка расчета (Да – информ. окно № 4.3. Нет – формулы (4.10) и (4.11), информ. окно № 4.4?).

Действительное значение индукции в зубце статора, Тл:

$$B_{Z(1)} = B'_{Z(1)} - 1{,}256 \cdot 10^{-6} \cdot k_{\text{п}(1)} \cdot H_{Z(1)}. \tag{4.10}$$

Отклонение действительного значения индукции от предполагаемого, Тл:

$$\Delta B_{Z(1)} = \left| B^{\text{пр}}_{Z(1)} - B_{Z(1)} \right|. \tag{4.11}$$

Таблица 4.2

Кривая намагничивания для зубцов асинхронных двигателей (сталь 2013)

Индукция, B Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Напряженность магнитного поля H, А/м									
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	584	585
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2160	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2890	3020
2	3150	3320	3500	3680	3860	4040	4260	4480	4700	4920
2,1	5140	5440	5740	6050	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	8920	9430	9940	10460	10980	11500	12000	12600	13200	13800
2,3	14400	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21400

Таблица 4.3

Кривая намагничивания для зубцов асинхронных двигателей (стали 2212, 2214 и 2312)

Индукция B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Напряженность магнитного поля H, А/м									
0,4	140	143	146	149	152	155	158	161	164	171
0,5	174	177	180	184	186	190	192	196	198	202
0,6	204	209	213	216	221	224	229	233	237	241
0,7	245	249	253	257	262	267	272	277	282	287
0,8	292	297	302	306	311	316	322	326	331	337
0,9	342	347	353	360	366	372	379	384	390	396
1	403	409	417	425	433	440	450	460	470	477
1,1	488	497	509	517	527	537	547	559	570	582
1,2	593	602	613	626	638	651	663	677	695	710
1,3	724	738	755	770	790	804	820	840	857	879
1,4	897	917	936	955	977	1000	1020	1040	1060	1090
1,5	1120	1150	1170	1210	1240	1270	1310	1330	1370	1410
1,6	1450	1490	1530	1560	1610	1650	1690	1750	1790	1840
1,7	1900	1940	2000	2070	2140	2220	2300	2380	2500	2600
1,8	2780	2800	2920	3050	3220	3330	3490	3610	3710	4000
1,9	4160	4350	4600	4800	5030	5330	5430	5790	6130	6420
2	6750	7170	7400	7790	8150	8520	9000	9400	9750	10200
2,1	10600	11000	11500	12100	12600	13000	13500	14100	14700	15400
2,2	15900	16500	17300	17800	18500	19100	19600	20300	21100	22000
2,3	23100	24300	25500	26800	28100	29500	30900	32400	33900	36400

Информационное окно № 4.4
Использование метода итераций для расчета действительного значения индукции в зубце статора

ЗУБЕЦ СТАТОРА

Расчетное значение индукции

$$B'_{Z(1)} = \ldots \text{Тл.}$$

Предполагаемое действительное значение индукции

$$B^{\text{пр}}_{Z(1)} = \ldots \text{ Тл.}$$

Действительное значение индукции

$$B_{Z(1)} = \ldots \text{ Тл.}$$

Отклонение от предполагаемого значения

$$\Delta B_{Z(1)} = \ldots \text{ Тл.}$$

Процесс поиска действительного значения индукции вести до тех пор, пока не будет получен результат $|\Delta B_{Z(1)}| \leqslant 0{,}025$ Тл.

Если в зубце статора расчетное значение индукции меньше или равно 1,8 Тл, то метод итераций не используется и действительное значение индукции в зубце принимается равным расчетному ($B_{Z(1)} = B'_{Z(1)}$).

Корректировка расчета (Да — информ. окно. № 4.3. Нет — информ. окно. № 4.5?).

Информационное окно № 4.5
Окончательный вариант расчета

Действительное зиачеиие индукции в зубце статора

$$B_{Z(1)} = \ldots \text{Тл.}$$

Напряженность магнитного поля в зубце статора

$$H_{Z(1)} = \cdots \text{А/м}.$$

Отклоненне

$$\Delta B_{Z(1)} = \ldots \text{ Тл}.$$

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 4.3. Нет — формулы (4.12)—(4.20), информ. окно № 4.6?).

Магнитное напряжение (МДС) зубцовой зоны статора, А:

$$F_{Z(1)} = 2\ h_{Z(1)} \cdot 10^{-3} \cdot H_{Z(1)}. \tag{4.12}$$

Реализуемая в программе методика расчета участка магнитной цепи зубцовой зоны ротора учитывает возможную непараллельность боковых граней зубцов ротора. Поэтому расчет ведется для трех сечений зубца ротора — максимальиого, минимального и среднего. Если зубец ротора с параллельными гранями ($\Delta b_{Z(2)} = \left|b'_{Z(2)} - b''_{Z(2)}\right| \le 0{,}5$ мм), то во всех трех сечениях зубца значения индукций будут одинаковыми.

Для каждого сечения зубца ротора используется та же методика расчета, что и для зубца статора:

$$k_{\text{п}(2)\text{в}} = \frac{b_{1(2)}}{0{,}97 b'_{Z(2)}}; \tag{4.13}$$

$$k_{\text{п}(2)\text{н}} = \frac{b_{2(2)}}{0{,}97 b''_{Z(2)}}; \tag{4.14}$$

$$b_{\text{п}(2)} = 0{,}5(b_{1(2)} + b_{2(2)}); \tag{4.15}$$

$$b_{Z(2)} = 0{,}5(b'_{Z(2)} + b''_{Z(2)}); \tag{4.16}$$

$$k_{\text{п}(2)\text{ср}} = \frac{b_{\text{п}(2)}}{0{,}97 b_{Z(2)}}. \tag{4.17}$$

Расчетные значения индукций в верхнем, нижнем и среднем сечениях зубца ротора, Тл:

$$B'_{Z(2)в} = \frac{B_\delta \cdot t_2}{0{,}97 b'_{Z(2)}};\qquad (4.18)$$

$$B'_{Z(2)н} = \frac{B_\delta \cdot t_2}{0{,}97 b''_{Z(2)}};\qquad (4.19)$$

$$B'_{Z(2)ср} = \frac{B_\delta \cdot t_2}{0{,}97 b_{Z(2)}}.\qquad (4.20)$$

Информационное окно № 4.6
Прогноз предполагаемых действительных значений индукций в зубце ротора

Отклонение от параллельности боковых граней зубца ротора $\Delta b_{Z(2)}$=... мм.

Введите предполагаемые значения действительных индукций в верхнем, нижнем и среднем сечениях зубца ротора и соответствующие им значения напряженностей магнитного поля:

Необходимая для принятия информация:

- марка стали...;
- расчетные значения индукций в верхнем, нижнем и среднем сечениях зубца ротора:

$$B'_{Z(2)В} = \dots \text{ Тл};$$

$$B'_{Z(2)Н} = \dots \text{ Тл};$$

$$B'_{Z(2)ср} = \dots \text{ Тл};$$

- если расчетное значение индукции в каком-либо сечении зубца ротора меньше или равно 1,8 Тл, то принять предполагаемое действительное значения индукции в этом сечении равным расчетному;
- если расчетное значение индукции в каком-либо сечении зубца ротора больше 1,8 Тл, то принять предполагаемое дей-

ствительное значение индукции в этом сечении несколько меньшим, чем расчетное;

- напряженность магнитного поля для каждого сечения зубца ротора определять:

марка стали 2013 — (см. табл. 4.2),

марки стали 2212, 2214 и 2312 — (см. табл. 4.3);

$B^{пр}_{Z(2)в} = ...?Тл$ $H_{Z(2)в} = ...?А/м$

$B^{пр}_{Z(2)н} = ...?Тл$ $H_{Z(2)н} = ...?А/м$

$B^{пр}_{Z(2)ср} = ...?Тл$ $H_{Z(2)ср} = ...?А/м$

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 4.6. Нет — формулы (4.21)—(4.26), иформ. окно № 4.7?).

Действительные значения индукций в верхнем, нижнем и среднем сечениях зубца ротора и их отклонения от предполагаемых значений индукций, Тл

$$B_{Z(2)в} = B'_{Z(2)в} - 1{,}256 \cdot 10^{-6} k_{п(2)в} H_{Z(2)в}, \qquad (4.21)$$

$$\Delta B_{Z(2)в} = \left| B^{пр}_{Z(2)в} - B_{Z(2)в} \right|; \qquad (4.22)$$

$$B_{Z(2)н} = B'_{Z(2)н} - 1{,}256 \cdot 10^{-6} k_{п(2)н} H_{Z(2)н}; \qquad (4.23)$$

$$\Delta B_{Z(2)н} = \left| B^{пр}_{Z(2)н} - B_{Z(2)н} \right|; \qquad (4.24)$$

$$B_{Z(2)ср} = B'_{Z(2)ср} - 1{,}256 \cdot 10^{-6} k_{П(2)ср} \cdot H_{Z(2)ср},; \qquad (4.25)$$

$$\Delta B_{Z(2)ср} = \left| B^{пр}_{Z(2)ср} - B_{Z(2)ср} \right|. \qquad (4.26)$$

Информационное окно № 4.7
Использование метода итераций для расчета действительных значений индукций в верхнем, нижнем и среднем сечениях зубца ротора

Зубец ротора

Расчетные значения индукций в сечениях, Тл:

верхнем $B'_{Z(2)в} = \dots$;

нижнем $B'_{Z(2)н} = \dots$;

среднем $B'_{Z(2)ср} = \dots$.

Предполагаемые действительные значения индукций в сечениях, Тл:

верхнем $B^{пр}_{Z(2)в} = \dots$;

нижнем $B^{пр}_{Z(2)н} = \dots$;

среднем $B^{пр}_{Z(2)ср} = \dots$.

Действительные значения индукций в сечениях, Тл:

верхнем $B_{Z(2)в} = \dots$;

нижнем $B_{Z(2)н} = \dots$;

среднем $B_{Z(2)ср} = \dots$.

Отклонения от предполагаемых значений индукций:

— верхней $\Delta B_{Z(2)в} = \dots$ Тл;

— нижней $\Delta B_{Z(2)н} = \dots$ Тл;

— средней $\Delta B_{Z(2)ср} = \dots$ Тл.

Процесс поиска действительного значения индукции в каждом сеченни вести до тех пор, пока $|\Delta B_{Z(2)}| \leq 0{,}025$ Тл.

Если в каком-либо сечении зубца ротора расчетное значение индукции меньше или равно 1,8 Тл, то метод итераций не используется и

действительное значение индукции в этом сечении принимается равным расчетному ($B_{Z(2)} = B'_{Z(2)}$).

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 4.6. Нет — информ. окно № 4.8?).

Информационное окно № 4.8
Окончательный вариант расчета

Действительные значения индукций в сечениях зубца ротора, Тл:

верхнем $B_{Z(2)в} = \dots;$

нижнем $B_{Z(2)н} = \dots;$

среднем $B_{Z(2)ср} = \dots.$

Напряженности магнитного поля в сечениях зубца ротора, А/м:

— верхнем $H_{Z(2)в} = \dots;$

— нижнем $H_{Z(2)н} = \dots;$

— среднем $H_{Z(2)ср} = \dots.$

Отклонения индукций в сечениях зубца ротора, Тл:

— верхнем $\Delta B_{Z(2)в} = \dots;$

— нижнем $\Delta B_{Z(2)н} = \dots;$

— среднем $\Delta B_{Z(2)ср} = \dots.$

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 4.6. Нет — (формулы (4.27)—(4.29), информ. окно № 4.9?).

Расчетная напряженность магнитного поля в зубцах ротора, А/м:

$$H_{Z(2)} = (H_{Z(2)в} + 4H_{Z(2)ср} + H_{Z(2)н})/6. \quad (4.27)$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора, А:

$$F_{Z(2)} = 2h_{Z(2)}10^{-3}H_{Z(2)}. \quad (4.28)$$

Коэффициент насыщения зубцовой зоны асинхронного двигателя

$$k_Z = 1 + \frac{F_{Z(1)} + F_{Z(2)}}{F_\delta}. \qquad (4.29)$$

Полученное значение k_Z позволяет предварительно оценить правильность выбранных размерных соотношений и обмоточных данных рассчитываемого асинхронного двигателя. Если $k_Z > 1{,}6$, то имеет место чрезмерное насыщение зубцовой зоны, а если $k_Z < 1{,}2$, то зубцовая зона мало использована или воздушный зазор взят слишком большим. В обоих случаях в расчет должны быть внесены соответствующие коррективы.

Информационное окно № 4.9
Проверка правильности выбора размерных соотношений зубцовых зон статора и ротора и величины воздушного зазора

Магнитное напряжение (МДС) воздушного зазора $F_\delta = \dots$ А.

Магнитное напряжение (МДС) зубцовой зоны статора $F_{Z(1)} = \dots$ А.

Магнитное напряжение (МДС) зубцовой зоны ротора $F_{Z(2)} = \dots$ А.

Коэффициент насыщения зубцовой зоны $k_Z = \dots$.

При правильно выбранных размерных соотношениях зубцовых зон статора и ротора и величины воздушного зазора $1{,}2 \leqslant k_Z \leqslant 1{,}6$.

Если $k_Z > 1{,}6$, то чрезмерное насыщение зубцовой зоны или зазор взят слишком малым.

Если $k_Z < 1{,}2$, то зубцовая зона мало использована или зазор взят слишком большим.

Корректировка расчета (Да — второй и третий фрагменты программы. Нет — формулы (4.30)—(4.32), информ. окно № 4.10?).

Высота ярма статора, м:

$$h_a = 0{,}5(D_a - D) - h_{\text{П}(1)} \cdot 10^{-3}. \qquad (4.30)$$

Длина средней магнитной силовой линии в ярме статора, м:

$$L_a = \pi(D_a - h_a)/(2p). \quad (4.31)$$

Индукция в ярме статора, Тл:

$$B_a = \frac{\Phi}{k_c \cdot 2h_a \cdot l_\delta} = \frac{\Phi}{1{,}94 h_a l_\delta}. \quad (4.32)$$

Информационное окно № 4.10
Расчет магнитной цепи ярма статора

Введите значение напряженности магнитного поля в ярме статора.

Необходимая для принятия решения информация:

- марка стали ...
- индукция в ярме статора B_a = ... Тл;
- напряженность магнитного поля определить:

сталь марки 2013 (табл. 4.4);

сталь марок 2212, 2214 и 2312 (табл. 4.5).

H_a = ...? А/м

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 4.10. Нет — формулы (4.33)—(4.40), информ. окно № 4.11?).

Магнитное напряжение (МДС) ярма статора, А:

$$F_a = L_a \cdot H_a. \quad (4.33)$$

Условная высота ярма ротора, м:

$$\Delta D = 0{,}75\left(\frac{D_2}{2} - h_{п(2)} \cdot 10^{-3}\right). \quad (4.34)$$

Таблица 4.4

Кривая намагничивания для ярма асинхронных двигателей (сталь 2013)

Индукция B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Напряженность магнитного поля H, А/м									
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78
0,6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0,7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0,8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1,1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1,2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1,3	320	327	334	341	349	357	365	373	382	391
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1,5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726
1,6	750	788	826	864	902	940	982	1020	1070	1110
1,7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1,8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1,9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8400	9000	9700

Таблица 4.5

Кривая намагничивания для ярма асинхронных двигателей (стали 2212, 2214 и 2312)

Индукция B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Напряженность магнитного поля H, А/м									
0,4	89	91	93	94	96	98	100	102	104	106
0,5	108	110	113	115	118	120	122	124	126	128
0,6	131	134	136	139	141	144	147	150	153	156
0,7	159	162	166	169	172	176	180	183	186	190
0,8	194	198	201	204	208	212	216	220	223	227
0,9	231	235	239	243	248	252	255	260	265	269
1	274	279	284	289	295	300	305	311	318	323
1,1	332	338	344	351	357	367	374	382	390	398
1,2	410	418	426	435	444	455	466	475	487	498
1,3	509	521	533	546	558	572	585	600	618	635
1,4	656	675	695	717	740	763	789	815	843	870
1,5	905	934	965	1000	1040	1090	1130	1190	1240	1290
1,6	1370	1440	1520	1590	1660	1720	1820	1910	2010	2100
1,7	2180	2310	2410	2250	2610	2720	2840	2980	3130	3290
1,8	3460	3630	3800	3970	4140	4301	4490	4670	4850	5040
1,9	5220	5600	6000	6400	6900	7400	7900	8500	9100	9700
2	10400	11100	11800	12500	13300	14100	14900	15800	16700	17600

Если $2p = 2$ или $2p = 4$ и $D_j > \Delta D$, то расчетная высота ярма ротора, м:

$$h'_j = \frac{2 + \frac{2p}{2}}{3{,}2 \cdot \frac{2p}{2}} \left(0{,}5D_2 - h_{п(2)} \cdot 10^{-3}\right). \qquad (4.35)$$

Если $2p = 4$ и $D_j < \Delta D$ или $2p > 4$, то расчетная высота ярма ротора, м:

$$h'_j = 0{,}5(D_2 - D_j) - h_{п(2)} \cdot 10^{-3}. \qquad (4.36)$$

Индукция в ярме ротора, Тл:

$$B_j = \frac{\Phi}{2k_c h'_j l_\delta} = \frac{\Phi}{1{,}94 h'_j \cdot l_\delta}. \qquad (4.37)$$

Геометрическая высота ярма ротора, м:

$$h_j = 0{,}5(D_2 - D_j) - h_{п(2)} \cdot 10^{-3}. \qquad (4.38)$$

Длина средней магнитной силовой линии в ярме ротора, м:

$$L_j = 2 \cdot h_j, \text{ если } 2p = 2; \qquad (4.39)$$

$$L_j = \pi (D_j + h_j)/(2p), \text{ если } 2p > 2. \qquad (4.40)$$

Информационное окно № 4.11
Определение напряженности магнитного поля в ярме ротора и расчет намагничивающего тока

Введите значение напряженности магнитного поля в ярме ротора.

Необходимая для принятия решения информация:

- марка стали ...

- индукция в ярме ротора $B_j = \dots$ Тл;
- напряженность магнитного поля в ярме ротора определять:

сталь марки 2013 (см. табл. 4.4);

сталь марок 2212, 2214 и 2312 (см. табл. 4.5).

$H_j = \dots ?$ А/м

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 4.11. Нет — формулы (4.41)—(4.45), информ. окно № 4.12?).

Магнитное напряжение (МДС) ярма ротора, А:

$$F_j = L_j \cdot H_j \,. \tag{4.41}$$

Суммарное магнитное напряжение (суммарная МДС) магнитной цепи асинхронного двигателя на одну пару полюсов, А:

$$F_ц = F_\delta + F_{Z(1)} + F_{Z(2)} + F_a + F_j \,. \tag{4.42}$$

Коэффициеит насыщения магнитной цепи

$$k_\mu = F_ц / F_\delta \,. \tag{4.43}$$

Для рационально спроектированных асинхронных двигателей $1{,}3 \leqslant k_\mu \leqslant \leqslant 1{,}5$. Если $k_\mu < 1{,}3$, то в машине избыток стали, а если $k_\mu > 1{,}5$, то сильное насыщение (недостаток стали). Скорректировать расчет можно, изменив длину воздушного зазора или высоту оси вращения двигателя.

Намагничивающий ток (реактивная составляющая тока холостого хода асинхронного двигателя), А:

$$I_\mu = \frac{\left(\frac{2p}{2}\right) \cdot F_ц}{0{,}9\, m_1 \cdot W_1 \cdot k_{об1}} \,. \tag{4.44}$$

Намагничивающий ток в относительных единицах, о. е.:

$$I_{\mu *} = I_{\mu} / I_{1\text{н.пред}} . \qquad (4.45)$$

Относительное значение $I_{\mu *}$ служит определенным критерием правильности выбора воздушного зазора и расчета размеров магнитопровода и параметров обмотки статора двигателя. В рационально спроектированных двигателях относительное значение намагничивающего тока находится в пределах, приведенных в информационном окне № 4.12.

Информационное окно № 4.12
Проверка правильности выбора геометрических размеров магнитопровода

Коэффициент насыщения магнитной цепи асинхронного двигателя $k_{\mu} = \ldots$

При правильном расчете $1{,}3 \leqslant k_{\mu} \leqslant 1{,}5$.

Если $k_{\mu} < 1{,}3$, то в двигателе избыток стали. Если $k_{\mu} > 1{,}5$, то сильное насыщение магнитопровода (недостаток стали). Скорректировать расчет можно, изменив длину воздушного зазора или высоту оси вращения.

Намагничивающий ток в относительных единицах $I_{\mu *} = \ldots$

В рационально спроектированных асинхронных двигателях относительное значение намагничивающего тока находится в следующих пределах:

$I_{\mu *}$=0,18—0,2, если $2p = 2$;

$I_{\mu *}$=0,25—0,3, если $2p = 4$;

$I_{\mu *}$=0,35—0,4, если $2p = 6$;

$I_{\mu *}$=0,4—0,45, если $2p = 8$.

В двигателях малой мощности (менее 2—3 кВт) $I_{\mu*}$ может достигать значения 0,5—0,6, несмотря на правильно выбранные размеры и малое насыщение магнитопровода.

Скорректировать расчет можно, изменив длину воздушного зазора или высоту оси вращения.

Корректировка расчета (Да — первый фрагмент программы. Нет — информ. окно № 4.13?).

Информационное окно № 4.13
Расчет магнитной цепи закончен. Проверка введенных данных

Число, месяц, год	...
Ваши фамилия, инициалы	...
Группа	...
Руководитель, должность, звание, фамилия, инициалы	...

Данные технического задания на проектирование асинхронного двигателя:

1. Тип двигателя	Асинхронный с короткозамкнутым ротором, обмотка ротора «беличья клетка» (заливка алюминием)
2. Назначение	Общего исполнения или взрывозащищенный
3. Номинальный режим работы	$S1$
4. Номинальная мощность	$P_{2н}$=... кВт
5. Номинальное напряжение	Y/Δ,... В
6. Число полюсов	$2p$ = ...
7. Базисная частота	$f_{1н}$=... Гц
8. Частоты сети, при которых рассчитываются рабочие характеристики двигателя	f_1=... Гц
9. Закон изменения напряжения или ЭДС статора в зависимости от частоты	$U_1/U_{1н}$=... $E_1/E_{1н}$=...

10. Степень защиты от воздействия окружающей среды	*IP*...
11. Способ охлаждения	*IC*...
12. Исполнение по способу монтажа	*IM*...
13. Климатические условия	....
14. Класс нагревостойкости изоляции	*F*
15. Маркировка взрывозащиты	......

Проверьте данные, введенные в процессе расчета

1. Высота оси вращения	h = ...мм
2. Наружный диаметр статора	D_a = ...м
3. Внутренний диаметр статора	D = ... м
4. Внешний диаметр ротора	D_2 = ...м
5. Внутрениий диаметр ротора (диаметр вала)	D_J = ...м
6. Величина воздушиого зазора	δ = ...мм
7. Предварительное значение номинального фазного тока статора	$I_{1н\ пред.}$ = ...А
8. Магнитный поток	Φ = ...Вб
9. Расчетное значение индукции в воздушном зазоре	B_δ =...Тл
10. Расчетиая длина воздушного зазора	l_δ = ...м
11. Число витков в фазе статора	W_1 = ...вит
12. Обмоточный коэффициент обмотки статора	$k_{об1}$= ...
Геометрические размеры зубцовой зоны статора (все размеры в мм)	
13. Зубцовое деление	t_1 = ...мм
14. Шириаа шлица паза	$b_{ш(1)}$=...мм
15. Высота паза	$h_{п(1)}$ =...мм
16. Верхняя ширина паза	$b_{1(1)}$ =...мм
17. Нижняя ширина паза	$b_{2(1)}$ =...мм
18. Высота зубца	$h_{Z(1)}$ =...мм
19. Средняя ширина зубца	$b_{Z(1)}$ =...мм
20. Отклонение от параллельиости боковых граней зубца (из данных проверок правильности расчета) ($\Delta b_{Z(1)} \leq 0,5$ мм)	$\Delta\ b_{Z(1)}$=...мм
Геометрические размеры зубцовой зоны ротора (все размеры в мм):	
21. Идеитификатор формы паза	...
22. Зубцовое деление	$t_{(2)}$=...мм
23. Ширина шлица (прорези) ротора	$b_{ш(2)}$ =...мм

24. Условная ширина шлица (прорези) паза ротора	$b'_{ш(2)}=0$ (идентификатор 3) $b'_{ш(2)} = b_{ш(2)}=\ldots$ мм (идентификатор 4)
25. Высота паза	$h_{п(2)}=\ldots$ мм
26. Диаметр закругления верхней части паза	$b_{1(2)}=\ldots$ мм
27. Диаметр закругления нижней части паза	$b_{2(2)}=\ldots$ мм
28. Высота зубца	$h_{Z(2)}=\ldots$ мм
29. Ширина верхней части зубца	$b'_{Z(2)}=\ldots$ мм
30. Ширина нижней части зубца	$b''_{Z(2)}=\ldots$ мм
31. Отклонение от параллельности боковых граней зубца	$\Delta b_{Z(2)}=\ldots$ мм
32. Марка электротехнической стали	…
33. Предполагаемое значение действительной индукции в зубце статора	$B^{пр}_{Z(1)}$ = ...Тл
34. Напряженность магнитного поля в зубце статора	$H_{Z(1)}=\ldots$ А/м
35. Предполагаемое действительное значение индукции в верхнем сечении зубца ротора	$B^{пр}_{Z(2)в}$ = ...Тл
36. Напряженность магнитного поля в верхнем сечении зубца ротора	$H_{Z(2)в}=\ldots$ А/м
37. Предполагаемое действительное значение индукции в нижнем сечении зубца ротора	$B^{пр}_{Z(2)н}$ = ...Тл
38. Напряжениость магнитного поля в нижнем сечении зубца ротора	$H_{Z(2)н}=\ldots$ А/м
39. Предполагаемое действительное значение индукции в среднем сечении зубца ротора	$B^{пр}_{Z(2)ср}$ = ...Тл
40. Напряженность магнитного поля в среднем сечении зубца ротора	$H_{Z(2)ср}=\ldots$ А/м
41. Напряженность магнитного поля в ярме статора	$H_a=\ldots$ А/м
42. Напряженность магиитного поля в ярме ротора	$H_j=\ldots$ А/м

Просмотр введенных данных закончен.

Повторить (Да — информ. окио № 4.13?).

Результаты расчета — (Да — информ. окно № 4.14?).

Информационное окно № 4.14
Результаты расчета магнитной цепи асинхронного двигателя

$\gamma_1 = \ldots$ (4.1)

$\gamma_2 = \ldots$ (4.2)

$k_{\delta 1} = \ldots$ (4.3)

$k_{\delta 2} = \ldots$ (4.4)

$k_{\delta} = \ldots$ (4.5)

$F_{\delta} = \ldots$ А (4.6)

$b_{п(1)} = \ldots$ мм (4.7)

$k_{п(1)} = \ldots$ (4.8)

$B'_{z(1)} = \ldots$ Тл (4.9)

$B_{z(1)} = \ldots$ Тл (4.10)

$\Delta B_{z(1)} = \ldots$ Тл (4.11)

$(|\Delta B_{Z(1)}| \leqslant 0{,}025$ Тл)

$F_{Z(1)} = \ldots$ А (4.12)

$k_{п(2)в} = \ldots$ (4.13)

$k_{п(2)н} = \ldots$ (4.14)

$b_{п(2)} = \ldots$ мм (4.15)

$b_{Z(2)} = \ldots$ мм (4.16)

$k_{п(2)ср} = \ldots$ (4.17)

$B'_{z(2)в} = \ldots$ Тл (4.18)

$B'_{z(2)н} = \ldots$ Тл (4.19)

$B'_{z(2)ср} = \ldots$ Тл (4.20)

$B_{z(2)в} = \ldots$ Тл (4.21)

$\Delta B_{z(2)в} = \ldots$ Тл (4.22)

$(|\Delta B_{Z(2)в}| \leqslant 0{,}025$ Тл)

$B_{z(2)н} = \ldots$ Тл (4.23)

$\Delta B_{z(2)н} = \ldots$ Тл (4.24)

$(|\Delta B_{Z(2)н}| \leqslant 0{,}025$ Тл)

$B_{z(2)ср} = \ldots$ Тл (4.25)

$\Delta B_{z(2)ср} = \ldots$ Тл (2.26)

$(|\Delta B_{Z(2)ср}| \leqslant 0{,}025$ Тл)

$H_{Z(2)} = \ldots$ А/м (4.27)

$F_{Z(2)} = \ldots$ А (4.28)

$k_Z = \ldots$ (4.29)

$(1{,}2 \leqslant k_Z \leqslant 1{,}6)$

$h_a = \ldots$ м (4.30)

$L_a = \ldots$ м (4.31)

$B_a = \ldots$ Тл (4.32)

$F_a = \ldots$ А (4.33)

$\Delta D = \ldots$ м (4.34)

$h'_j = \ldots$ м (4.35)

($2p = 2$ или $2p = 4$ и $D_j > \Delta D$)

$h'_j = \ldots$ м (4.36)

($2p = 4$ и $D_j < \Delta D$ или $2p > 4$)

$B_j = \ldots$ Тл (4.37)

$h_j = \ldots$ м (4.38)

$L_j = \ldots$ м (4.39)

($2p = 2$)

$L_j = \ldots$ м (4.40)

($2p > 2$)

$F_j = \ldots$ А (4.41)

$F_ц = \ldots$ А (4.42)

$k_\mu = \ldots$ (4.43)

($1{,}3 \le k_\mu \le 1{,}5$)

$I_\mu = \ldots$ А (4.44)

$I_{\mu *} = \ldots$ о.е (4.45)

($I_{\mu *}$=0,18—0,2, если $2p$=2)

($I_{\mu *}$=0,25—0,3, если $2p$=4)

($I_{\mu *}$=0,35—0,4, если $2p$=6)

($I_{\mu *}$=0,4—0,45, если $2p$=8)

($I_{\mu *} \leqslant 0{,}6$, если $P_{2H} \leqslant 3$ кВт)

Просмотр результатов расчета закончен.

Повторить: (Да — инф. ок. № 4.14?).

Печать: (Да — инф. ок. № 4.13 и № 4.14?).

5. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НА ЭВМ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ НОМИНАЛЬНОГО РЕЖИМА
(пятый фрагмент программы)

Параметрами электрических машин называются активные и индуктивные сопротивления Т-образной электрической схемы замещения (рис. 5.1).

При расчете параметров асинхронного двигателя в рабочих режимах в пределах изменения скольжения от холостого хода до номинального явлениями действия эффектов вытесиения тока и насыщения пренебрегают и поэтому считают параметры асинхронного двигателя постоянными.

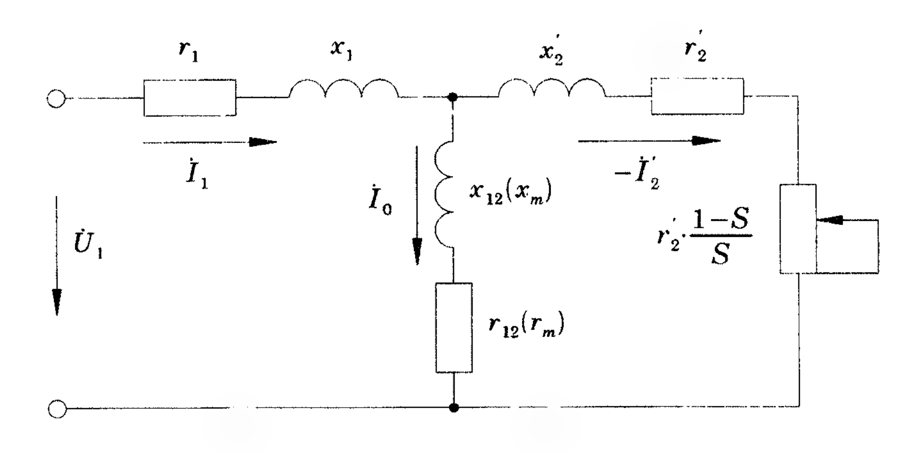


Рис. 5.1. Т-образная электрическая схема замещения асинхронного двигателя

Информационное окно № 5.1
Расчет и оптимизация параметров асинхронного двигателя для номинального режима. Ввод исходных данных

Рассчитываются следующие параметры:

r_1 — активное сопротивление фазы обмотки статора;

r'_2 — активное сопротивление фазы обмотки ротора, приведенное к статору. Активные сопротивления r_1 и r'_2 должны быть приведены к расчетной для данного класса нагревостойкости изоляции температуре;

x_1 — индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора;

x'_2 — индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора, приведенное к статору.

Сопротивление взаимной индукции обмоток статора и ротора x_{12} и активное сопротивление r_{12}, характеризующее магнитные потери, рассчитываются в шестом фрагменте программы «Расчет потерь в асинхронном двигателе».

Число, месяц, год	...?
Ваши фамилия, инициалы	...?
Группа	...?
Руководитель, должность, звание, фамилия, инициалы	...?

Введите данные технического задания на проектирование асинхронного двигателя:

1. Тип двигателя	Асинхронный с короткозамкнутым ротором, обмотка ротора «беличья клетка» (заливка алюминием)
2. Назначение	Общего исполнения или взрывозащищенный

3. Номинальный режим работы	$S1$
4. Номинальиая мощность	$P_{2н}$=... кВт
5. Номинальное напряжение	Y/Δ,... В
6. Число полюсов	$2p$ = ...
7. Базисная частота	$f_{1н}$=... Гц
8. Частоты сети, при которых рассчитываются рабочие характеристики двигателя	f_1=... Гц
9. Закон изменения напряжения или ЭДС статора в зависимости от частоты	$(U_1/U_{1н})$=... $(E_1/E_{1н})$=...
10. Степень защиты от воздействия окружающей среды	*IP*...
11. Способ охлаждения	*IC*...
12. Исполнение по способу монтажа	*IM*...
13. Климатические условия	....
14. Класс нагревостойкости изоляции	*F*
15. Маркироака взрывозащиты	......

Данные, необходимые для расчета активного сопротивления фазы статора:

1. Высота оси вращения двигателя	h = ...? мм
2. Предварительное значение номинального фазного тока статора	$I_{1н.пред.}$ = ...? А
3. Внутренний диаметр магнитопровода статора	D = ...? м
4. Число параллельных ветвей в фазе статора	a = ...
5. Расчетная длина воздушного зазора	l_δ = ...? м
6. Число витков в фазе статора	W_1 =...? вит
7. Относительный шаг обмотки статора	β_1 = ...
8. Высота паза статора	$h_{П(1)}$ = ...? мм
9. Число элементарных проводников в одном эффективном	$n_{эл}$ = ...?
10. Площадь поперечного сечения элементарного проводника	$q_{эл}$ = ...? мм^2

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 5.1. Нет — информ. окно № 5.2?).

Информационное окно № 5.2
Расчет активного сопротивления фазы статора

Введите значение коэффициентов из табл. 5.1.

Необходимая для принятия решения информация:

– число полюсов: $2p = \ldots$;

– обмотка статора всыпная из круглого медного провода. Класс нагревостойкости изоляции F (расчетная температура 115 °C).

Таблица 5.1

К расчету размеров лобовых частей катушек всыпной обмотки

Число полюсов $2p$	Лобовые части не изолированы		Лобовые части изолированы лентой	
	$K_л$	$K_{выл}$	$K_л$	$K_{выл}$
2	1,2	0,26	1,45	0,44
4	1,3	0,4	1,55	0,5
6	1,4	0,5	1,75	0,62
≥8	1,5	0,5	1,9	0,72

$K_{выл} = \ldots?$

$K_л = \ldots?$

Введите длину вылета прямолинейной части катушки (B), которая измеряется от торца сердечника статора до начала отгиба лобовой части катушки (рис. 5.2).

$B = 0{,}01$ м, если обмотка укладывается в пазы до запрессовки сердечника в корпус.

$B = 0{,}015$ м, если обмотка укладывается в пазы после запрессовки сердечника в корпус.

B = …? м

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 5.2. Нет — формулы (5.1)—(5.7), — информ. окно № 5.3?).

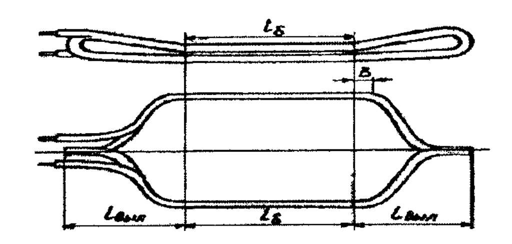


Рис. 5.2. Катушка двухслойной всыпной обмотки статора

Средняя ширина катушки, м, определяемая по дуге окружности, проходящей по серединам высоты пазов:

$$b_{кт} = \frac{\pi (D + h_{п(1)} \cdot 10^{-3})}{2p} \cdot \beta_1. \quad (5.1)$$

Вылет лобовых частей обмотки, м:

$$L_{выл} = K_{выл} \cdot b_{кт} + B. \quad (5.2)$$

Длина лобовых частей катушки, м:

$$L_{л} = K_{л} \cdot b_{кт} + 2B. \quad (5.3)$$

Средняя длина витка катушки, м:

$$L_{ср} = 2(l_{\delta} + L_{л}). \quad (5.4)$$

Общая длина проводников фазы обмотки статора, м:

$$L_1 = L_{ср} \cdot W_1. \quad (5.5)$$

Активное сопротивление фазы обмотки статора при расчетной температуре 115 °С, Ом:

$$r_1 = \rho_{115}\frac{L_1}{a \cdot n_{эл} \cdot q_{эл} \cdot 10^{-6}} = \rho_{115}\frac{L_1}{a \cdot q_{эф} \cdot 10^{-6}},$$

где $\rho_{115} = 10^{-6}/41$, Ом·м — удельное сопротивление меди при расчетной температуре 115 °С;

$q_{эф} = n_{эл}q_{эл}$— площадь поперечного сечения эффективного проводника, мм^2.

В программе это уравнение используется в виде

$$r_1 = \frac{L_1 \cdot 10^{-6}}{41 \cdot a \cdot n_{эл} \cdot q_{эл} \cdot 10^{-6}} = \frac{L_1}{41 \cdot a \ n_{эл} \cdot q_{эл}}. \quad (5.6)$$

Активное сопротивление фазы статора в относительных единицах, о. е.

$$r_{1*} = r_1 \frac{I_{1н.пред}}{U_{1н}}. \quad (5.7)$$

Информационное окно № 5.3
Проверка значения активного сопротивления фазы статора

Рассчитанное значение активного сопротивления фазы статора

r_{1*}=..., о. е.

При правильном расчете $0{,}01 \leqslant r_{1*} \leqslant 0{,}07$.

Если $r_{1*}<0{,}01$, то завышена площадь поперечного сечения эффективного проводника.

Если $r_{1*}>0{,}07$, то плотность тока в эффективном проводнике выше рациональной.

В асинхронных двигателях номинальной мощность $P_{2н}< 3$ кВт активное сопротивление может быть более 0,07 о. е. при правильном выборе площади поперечного сечения эффективного проводника.

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 5.2. Нет — информ. окно № 5.4?).

Информационное окно № 5.4
Расчет активного сопротивления фазы обмотки ротора

Обмотка ротора литая из алюминия типа «беличья клетка» (рис. 5.3).

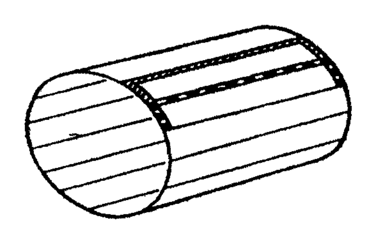


Рис. 5.3. Фазы обмотки короткозамкнутого ротора

Введите данные, необходимые для расчета активного сопротивления фазы ротора:

1. Число пазов ротора	Z_2 = ...?, паз
2. Обмоточный коэффициент обмотки статора	$k_{об1}$= ...?
3. Отношение тока в стержне к току в замыкающем кольце	Δ=...?
4. Площадь сечения стержня ротора	q_c = ...? мм^2
5. Площадь сечения замыкающего кольца	$q_{кл}$ = ? мм^2
6. Средний диаметр замыкающего кольца	$D_{кл.ср.}$= ...?м
7. Зубцовое деление статора	t_1=...? мм
8. Зубцовое деление ротора	t_2=...? мм

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 5.4. Нет — (формулы (5.8)—(5.13), — информ. окно № 5.5?).

Сопротивление участка замыкающего кольца, заключенного между двумя соседними стержнями, Ом:

$$r_{кл} = \rho_{кл} \frac{\pi \cdot D_{кл.ср.}}{Z_2(q_{кл} \cdot 10^{-6})},$$

где $\rho_{кл} = 10^{-6}/20{,}5$ Ом·м — удельное сопротивление алюминия при расчетной температуре 115 °С.

В программе это уравнение используется в виде

$$r_{кл} = \frac{10^{-6}\pi \cdot D_{кл\,ср}}{20{,}5 \cdot Z_2 \cdot q_{кл} \cdot 10^{-6}} = \frac{\pi \cdot D_{кл\,ср}}{20{,}5 \cdot Z_2 \cdot q_{кл}}. \quad (5.8)$$

Сопротивление стержня, Ом:

$$r_с = \rho_с \frac{l_\delta}{q_с \cdot 10^{-6}},$$

где $\rho_с = \rho_{кл} = 10^{-6}/20{,}5$ Ом·м.

В программе это уравнение используется в виде

$$r_с = \frac{10^{6} \cdot l_\delta}{20{,}5 \cdot q_с \cdot 10^{-6}} = \frac{l_\delta}{20{,}5 \cdot q_с}. \quad (5.9)$$

Активное сопротивление фазы обмотки ротора, Ом:

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{кл}}{\Delta^2}. \quad (5.10)$$

Приведенное к статору активное сопротивление фазы ротора, Ом:

$$r_2' = r_2 \frac{4m_1(W_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2},$$

где $m_1 = 3$ — число фаз обмотки статора.

В программе это уравнение используется в виде

$$r_2' = r_2 \frac{12 \cdot (W_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2}. \quad (5.11)$$

Приведенное к статору активное сопротивление фазы ротора, о.е.:

$$r'_{2*} = r'_2 \frac{I_{1н\ пред}}{U_{1н}} \qquad (5.12)$$

Отношение зубцовых делений ротора и статора

$$\Delta t_z = t_2 / t_1 . \qquad (5.13)$$

Информационное окно № 5.5
Проверка значения активного сопротивления фазы ротора

Рассчитанное значение сопротивления фазы ротора

r'_{2*}=..., о. е.

При правильном расчете $0{,}01 \leqslant r'_{2*} \leqslant 0{,}07$.

Если $r'_{2*} < 0{,}01$, то завышена площадь поперечного сечения стержня обмотки ротора.

Если $r'_{2*} > 0{,}07$, то площадь поперечного сечения стержня обмотки ротора меньше рациональной.

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 5.4. Нет — информ. окно № 5.6?).

Информационное окно № 5.6
Расчет индуктивного сопротивления рассеяния фазы статора

Введите данные, необходимые для расчета:

1. Число пазов на полюс и фазу	q=...? паз
2. Полюсное деление	τ =...? м
3. Воздушный зазор	δ = ...? мм
4. Ширина шлица паза статора	$b_{ш(1)}$ = ...? мм
5. Высота клиновой части паза статора	$h_{к(1)}$ = ...? мм
6. Высота паза статора под укладку проводов	$h_{пк(1)}$ = ...? мм
7. Ширина верхней части паза статора	$b_{1(1)}$ = ...? мм

8. Идентификатор формы паза ротора Паз ротора: закрытый — 3, полузакрытый — 4	...?
9. Ширина шлица (прорези) паза ротора	$b_{ш(2)}$ = ...? мм

Дополнительно введите следующие размеры трапецеидального полузакрытого паза статора (рис. 5.4):

— высоту шлица паза статора $h_{ш(1)}$:

$h_{ш(1)} = 0{,}5$ мм при $h \leqslant 132$ мм;

$h_{ш(1)} = 1$ мм при $h \geqslant 160$ мм;

$h_{ш(1)}$ = ... ? мм

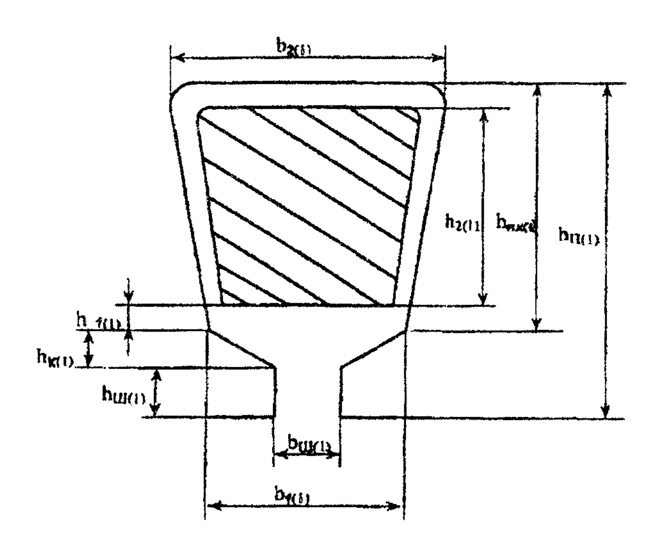


Рис. 5.4. Конфигурация паза статора

— припуск по высоте паза статора $\Delta h_{п(1)}$:

$\Delta h_{п(1)} = 0{,}1$ мм при $h = 50$–132 мм;

$\Delta h_{п(1)} = 0{,}2$ мм при $h = 160$–250 мм;

$\Delta h_{п(1)}$ =...? мм

— одностороннюю толщину корпусной изоляции паза статора (класс нагревостойкости изоляции F):

$b_{из}$ =0,2 мм при h = 50—80 мм;

$b_{из}$ =0,25 мм при h = 90—132 мм;

$b_{из}$ =0,4 мм при h = 160—250 мм.

$b_{из}$ = ...? мм

Введите значение коэффициента $k'_{ск}$ (рис. 5.5).

Необходимая информация:

— пазы статора полузакрытые без скоса ($\beta_{ск}$=0);

— $\Delta t_z = t_2/t_1 = ...$

$k'_{ск}$ = ...?

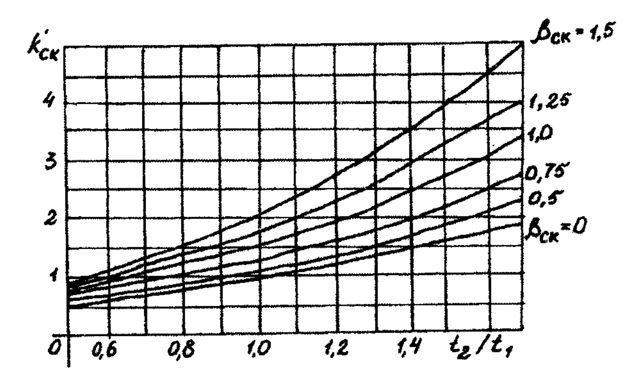


Рис. 5.5. Значеиие коэффициевта $k'_{ск} = f\left(\dfrac{t_2}{t_1}, \beta_{ск}\right)$

Введите условную величину ширины шлица (прорези) паза ротора ($b'_{ш(2)}$).

Необходимая информация:

— $b'_{ш(2)}$ =0, если паз ротора закрытый (идентификатор 3);

— $b'_{ш(2)} = b_{ш(2)}$, если паз ротора полузакрытый (идентификатор 4).

$b'_{ш(2)} = \ldots ?$ мм

Чтобы рассчитать индуктивное сопротивлеиие рассеяния фазы статора, необходимо определить коэффициенты магнитных проводимостей пазового, лобового и дифференциального рассеяния статора.

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 5.6. Нет — формулы (5.14)—(5.31) информ. окно № 5.7?).

Расчет коэффициента магнитной проводимости пазового рассеяния для паза статора (формулы (5.14)—(5.19)).

Если $\beta_1 = 1$, то

$$\begin{cases} k'_в = 1, \\ k_в = 1. \end{cases} \tag{5.14}$$

Если $0{,}67 \leqslant \beta_1 < 1$, то

$$\begin{cases} k'_в = 0{,}25(1 + 3\beta_1), & (5.15) \\ k_в = 0{,}25(1 + 3k'_в). & (5.16) \end{cases}$$

Если $0{,}33 \leqslant \beta_1 < 0{,}67$, то

$$\begin{cases} k'_в = 0{,}25(6\beta_1 - 1), \\ k_в \text{ вычисляют по (5.16)}. \end{cases} \tag{5.17}$$

Высота трапеции паза статора, заполненная обмоточным проводом, мм (см. рис. 5.4):

$$h_{2(1)} = h_{п\,к\,(1)} - \Delta h_{п\,(1)} - 2b_{из} . \tag{5.18}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяиия статора

$$\lambda_{п(1)} = \frac{h_{2(1)}}{3b_{1(1)}} k_\beta + \left(\frac{h_{1(1)}}{b_{1(1)}} + \frac{3h_{к(1)}}{b_{1(1)} + 2b_{ш(1)}} + \frac{h_{ш(1)}}{b_{ш(1)}} \right) k'_\beta ,$$

где $h_{1(1)} = 0$, так как для двигателей с высотой оси вращения $h =$ = 50—250 мм в пазах статора примеияется не клин, а пазовая крышка. В программе это уравнение используется в виде

$$\lambda_{п(1)} = \frac{h_{2(1)}}{3b_{1(1)}} k_\beta + \left(\frac{3h_{к(1)}}{b_{1(1)} + 2b_{ш(1)}} + \frac{h_{ш(1)}}{b_{ш(1)}} \right) k'_\beta . \tag{5.19}$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния обмотки статора

$$\lambda_{л(1)} = 0{,}34 \frac{q}{l_\delta} (L_л - 0{,}64\beta_1 \tau) . \tag{5.20}$$

Расчет коэффициента магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора (формулы (5.21)—(5.27)).

$$\xi_{(1)} = 2k'_{ск} \cdot k_\beta - k^2_{об1} \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 . \tag{5.21}$$

Коэффициент увеличения воздушного эазора из-эа зубчатости магнитопроводов статора и ротора (k_δ) рассчитывается по формулам (5.22)—(5.26):

$$\gamma_1 = \frac{(b_{ш(1)} / \delta)^2}{5 + (b_{ш(1)} / \delta)} ; \tag{5.22}$$

$$\gamma_2 = \frac{(b'_{ш(2)} / \delta)^2}{5 + (b'_{ш(2)} / \delta)} ; \tag{5.23}$$

$$k_{\delta 1} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \cdot \delta} ; \tag{5.24}$$

$$k_{\delta 2} = \frac{t_2}{t_2 - \gamma_2 \cdot \delta};\qquad (5.25)$$

$$k_\delta = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2}.\qquad (5.26)$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора

$$\lambda_{д(1)} = \frac{t_1}{12 k_\delta \cdot \delta} \cdot \xi_{(1)}.\qquad (5.27)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора, Ом:

$$x_1 = 15{,}8 \frac{f_{1н}}{100} \cdot \left(\frac{W_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{2 l_\delta}{2p \cdot q} (\lambda_{п(1)} + \lambda_{л(1)} + \lambda_{д(1)}).\qquad (5.28)$$

В относительных единицах, о. е.:

$$x_{1*} = x_1 \frac{I_{1н\ пред.}}{U_{1н}}.\qquad (5.29)$$

Коэффициенты размерных соотношений зубцовой зоны ротора:

$$\Delta b_{\delta 2} = b_{ш(2)} / \delta;\qquad (5.30)$$

$$\Delta b_{t2} = b_{ш(2)} / t_2.\qquad (5.31)$$

Информационное окно № 5.7
Проверка значения индуктивного сопротивления рассеяния фазы статора

Рассчитанное значение индуктивиого сопротивлеиия фазы статора

x_{1*}=... о. е.

При правильном расчете $x_{1*} = 0{,}08$–$0{,}14$ о. е.

Уменьшить значение индуктивного сопротивления рассеяния фазы статора можно:

- путем увеличения раскрытия паза статора;
- конструируя паз статора меньшей глубины, но более широкий при сохранении площади паза;
- путем увеличения воздушного зазора.

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 5.6. Нет — информ. окно № 5.8?).

Информационное окно № 5.8
Расчет индуктивного сопротивления рассеяния фазы ротора

Паз ротора грушевидный закрытый (идентификатор 3) или полузакрытый (идентификатор 4), (рис. 5.6).

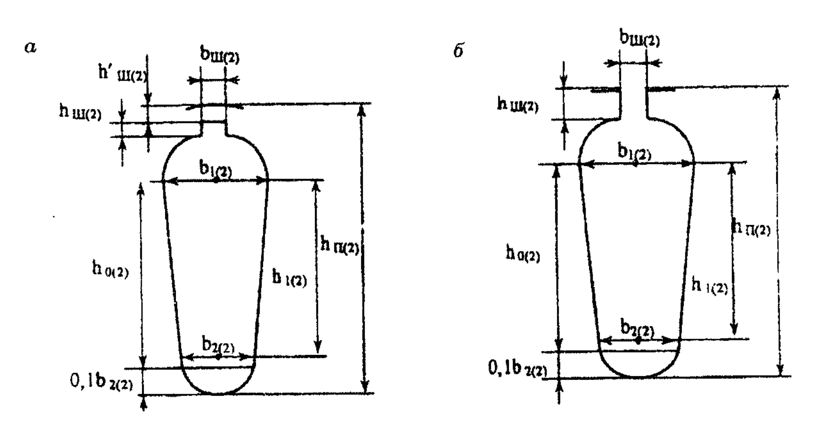


Рис. 5.6. Конфигурации пазов ротора:
а — закрытый (идентификатор 3); *б* — полузакрытый (идентификатор 4)

Введите данные, необходимые для расчета индуктивного сопротивления рассеяния фазы ротора:

1. Предварительное значение номинального фазного тока ротора	$I_{2н.пред.}$ = ...? А
2. Расстояние между центрами окружностей паза ротора	$h_{1(2)}$ = ...? мм
3. Диаметр закругления верхней части паза ротора	$b_{1(2)}$ = ...? мм
4. Диаметр закругления нижней части паза ротора	$b_{2(2)}$ = ...? мм
5. Высота шлица (глубина прорези) паза ротора	$h_{ш(2)}$= ...? мм
6.Высота перемычки над пазом ротора Если паз полузакрытый, то $h'_{ш(2)} = 0$	$h'_{ш(2)}$ = ...? мм
7. Высота сечения замыкающего кольца ротора	$h_{кл}$ = ...? мм
8. Ширина замыкающего кольца	$b_{кл}$ = ...? мм

Введите значение коэффициента Δ_Z (рис. 5.7).

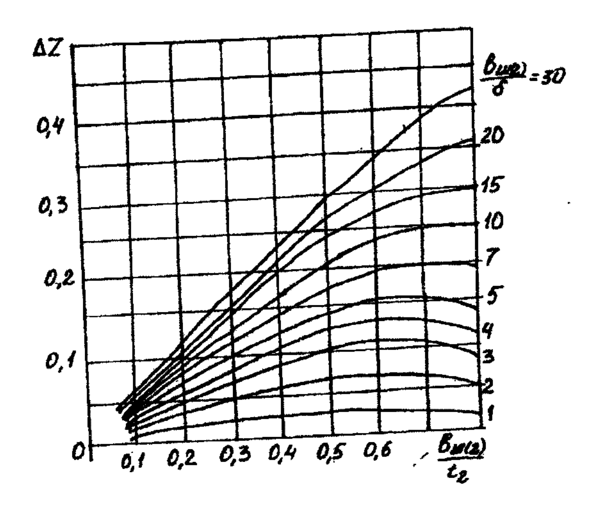


Рис. 5.7. Значение коэффициента Δ_Z

Необходимая информация:

— коэффициенты размерных соотношений зубцовой зоны ротора:

$$\Delta b_{\delta 2} = b_{ш(2)} / \delta = ...;$$

$$\Delta b_{t2} = b_{ш(2)} / t_2 = ...;$$

$$\Delta_Z = f\left(\frac{b_{ш(2)}}{\delta}, \frac{b_{ш(2)}}{t_2}\right).$$

$\Delta_Z = \ldots ?$

Чтобы рассчитать индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора, необходимо определить коэффициенты магнитных проводимостей пазового, лобового и дифференциального рассеяния ротора.

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 5.8. Нет — информ. окно. № 5.9?).

Расчет коэффициента магнитной проводимости пазового рассеяния ротора (формулы (5.32)—(5.34)).

Расчетная высота паза ротора, мм:

$$h_{0(2)} = h_{1(2)} + 0{,}4b_{2(2)}. \quad (5.32)$$

Если паз ротора закрытый (идентификатор 3, см. рис. 5.6, а), то

$$\lambda_{п(2)} = \frac{h_{0(2)}}{3b_{1(2)}}\left(1 - \frac{\pi \cdot b_{1(2)}^2}{8q_c}\right)^2 + 0{,}66 - \frac{b_{ш(2)}}{2b_{1(2)}} + \frac{h_{ш(2)}}{b_{ш(2)}} + 1{,}12 \cdot 10^3 \frac{h'_{ш(2)}}{I_{2н\ пред}}. \quad (5.33)$$

Если паз ротора полузакрытый (идентификатор 4,см. рис. 5.6, б), то

$$\lambda_{п(2)} = \frac{h_{0(2)}}{3b_{1(2)}}\left(1 - \frac{\pi \cdot b_{1(2)}^2}{8q_c}\right)^2 + 0{,}66 - \frac{b_{ш(2)}}{2b_{1(2)}} + \frac{h_{ш(2)}}{b_{ш(2)}}. \quad (5.34)$$

Расчет коэффициента магнитной проводимости лобового рассеяния ротора производится по формуле

$$\lambda_{л(2)} = \frac{2{,}3\ D_{кл.ср.}}{Z_2 \cdot l_\delta \cdot \Delta^2} \cdot \lg\left(\frac{4{,}7\ D_{кл.ср}}{(h_{кл} + 2b_{кл}) \cdot 10^{-3}}\right), \quad (5.35)$$

расчет коэффициента магнитиой проводимости дифференциального рассеяния ротора (формулы (5.36)–(5.37))

$$\xi_{(2)} = 1 + 0{,}2\left(\frac{\pi \cdot 2p}{2 \cdot Z_2}\right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{2p}{2Z_2}\right)^2}. \qquad (5.36)$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора

$$\lambda_{д(2)} = \frac{t_2}{12k_\delta \delta} \cdot \xi_{(2)}. \qquad (5.37)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы короткозамкнутого ротора, Ом:

$$x_2 = 7{,}9 \cdot f_{1н} \cdot l_\delta \cdot 10^{-6}(\lambda_{п(2)} + \lambda_{л(2)} + \lambda_{д(2)}). \qquad (5.38)$$

Приведеиное к статору индуктивное сопротивление рассеяиия фазы ротора, Ом:

$$x_2' = x_2 \cdot \frac{12(W_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2}. \qquad (5.39)$$

В относительных единицах, о. е.:

$$x_{2*}' = x_2' \cdot \frac{I_{1н.пред.}}{U_{1н}}. \qquad (5.40)$$

Информационное окно № 5.9
Проверка значения индуктивного сопротивления фазы ротора

Рассчитанное значение индуктивного сопротивления фазы ротора

$x'_{2*}=\ldots$ о. е.

При правильном расчете $x'_{2*}=0{,}1$—$0{,}16$ о. е.

Уменьшить значение индуктивного сопротивления рассеяния фазы ротора можно:

- путем изменения конфигурации паза ротора с закрытой на полузакрытую;
- увеличения ширины прорези паза в полузакрытом пазу;
- увеличения воздушного зазора.

Корректировка расчета: (Да — информ. окно № 5.8. Нет — информ. окно № 5.10?).

Информационное окно № 5.10 Расчет параметров асинхронного двигателя закончен. Проверка введенных данных

Число, месяц, год	...
Ваши фамилия, инициалы	...
Группа	...
Руководитель, должность, звание, фамилия, инициалы	...

Данные технического задания на проектирование асинхронного двигателя:

1. Тип двигателя	Асинхронный с короткозамкнутым ротором, обмотка ротора «беличья клетка» (заливка алюминием)
2. Назначение	Общего исполнения или взрывозащищенный
3. Номинальный режим работы	$S1$
4. Номинальная мощность	$P_{2н}=\ldots$ кВт
5. Номинальное напряжение	Y/Δ,... В
6. Число полюсов	$2p=\ldots$
7. Базисная частота	$f_{1н}=\ldots$ Гц
8. Частоты сети, при которых рассчитываются рабочие характеристики двигателя	$f_1=\ldots$ Гц

9. Закон изменения напряжения или ЭДС статора в зависимости от частоты	$U_1/U_{1н}$=... $E_1/E_{1н}$=...
10. Степень защиты от воздействия окружающей среды	*IP*...
11. Способ охлаждения	*IC*...
12. Исполнение по способу монтажа	*IM*...
13. Климатические условия	....
14. Класс нагревостойкости изоляции	*F*
15. Маркировка взрывозащиты	......

Данные, введенные в процессе расчета:

1. Высота оси вращения двигателя	h = ... мм
2. Предварительное значение номинальиого фазного тока статора	$I_{1н.пред.}$ = ... А
3. Внутренний диаметр магнитопровода статора	D = ...м
4. Число параллельных ветвей в фазе обмотки статора	a = ...
5. Расчетная длина воздушного зазора	l_δ = ... м
6. Число витков в фазе статора	W_1 =... вит
7. Отиосительный шаг обмотки статора	β_1 = ...
8. Высота паза статора	$h_{п(1)}$ = ... мм
9.Число элементарных проводииков в одном эффективном	$n_{эл}$ = ...
10. Площадь поперечного сечения элементарного проводника	$q_{эл}$ = ...мм^2
11. Коэффициент $K_{выл}$	$K_{выл}$=...
12. Коэффициент $K_л$	$K_л$=...
13. Длина вылета прямолинейной части катушки	B=...м
14. Число пазов ротора	Z_2 = ... паз
15. Обмоточный коэффициент обмотки статора	$k_{об1}$= ...
16. Отиошение тока в стержне к току в замыкающем кольце	Δ=...
17. Площадь сечения стержня ротора	q_c = ... мм^2
18. Площадь сечения замыкающего кольца	$q_{кл}$ = ... мм^2
19. Средний диаметр замыкающего кольца	$D_{кл.ср.}$= ... м
20. Зубцовое деление статора	t_1 = ... мм
21. Зубцовое деление ротора	t_2 = ... мм
22. Воздушный зазор	δ = ... мм
23. Число пазов на полюс и фазу	q=...паз
24. Полюсное деление	τ =... м
25. Ширина шлица паза статора	$b_{ш(1)}$ = ... мм

26. Высота клиновой части паза статора	$h_{к(1)}$ = ... мм
27.Высота паза статора под укладку проводов	$h_{п.к.(1)}$ = ... мм
28. Ширина верхней части паза статора	$b_{1(1)}$ = ...мм
29. Идентификатор формы паза ротора Паз ротора: закрытый — 3, полузакрытый — 4	...
30. Ширина шлица (прорези) паза ротора	$b_{ш(2)}$ = ... мм
31. Условная ширина шлица (прорези) паза ротора	$b'_{ш(2)}=0$ (идентификатор 3) $b'_{ш(2)} = b_{ш(2)}$=...мм (идентификатор 4)
32. Высота шлица паза статора	$h_{ш(1)}$=... мм
33. Припуск по высоте паза статора	$\Delta h_{п(1)}$=... мм
34. Толщина корпусной изоляции паза статора	$b_{из}$=...мм
35. Коэффициент $k'_{ск}$	$k'_{ск}$=...
36. Предварительное значение номинального фазного тока ротора	$I_{2н\,пред}$ = ... А
37. Расстояние между центрами окружностей паза ротора	$h_{1(2)}$ = ...мм
38. Диаметр закругления верхней части паза ротора	$b_{1(2)}$ = ... мм
39. Диаметр закругления нижней части паза ротора	$b_{2(2)}$ = ... мм
40. Высота шлица (глубина прорези) паза ротора	$h_{ш(2)}$= ... мм
41. Высота перемычки над пазом ротора. Если паз полузакрытый, то $h'_{ш(2)} = 0$	$h'_{ш(2)}$ = ... мм
42. Высота сечения замыкающего кольца ротора	$h_{кл}$ = ...мм
43. Ширина замыкающего кольца	$b_{кл}$ = ... мм
44. Коэффициент Δ_Z	Δ_Z=...

Просмотр введенных данных закончен.

Повторить: (Да — информ. окно № 5.10?).

Результаты расчета: (Да — информ. окно № 5.11?).

Информационное окно № 5.11
Результаты расчета параметров асинхронного двигателя для номинального режима

$b_{кт}$ = ... м (5.1) $L_{л}$ = ... м (5.3)

$L_{выл}$ = ...м (5.2) $L_{ср}$ = ...м (5.4)

$L_1 = \ldots$ м (5.5)

$r_1 = \ldots$ Ом (5.6)

$r_{1*} = \ldots$ о.е. (5.7)

($r_{1*} = 0{,}01 - 0{,}07$)

$r_{кл} = \ldots$, Ом (5.8)

$r_c = \ldots$ Ом (5.9)

$r_2 = \ldots$, Ом (5.10)

$r_2' = \ldots$ Ом (5.11)

$r_{2*}' = \ldots$ о. е. (5.12)

($r_{2*}' = 0{,}01 - 0{,}07$)

$\Delta t_Z = \ldots$ (5.13)

$k_\beta' = k_\beta = 1$ (5.14)

(если $\beta_1 = 1$)

$k_\beta' = \ldots$ (5.15)

(если $0{,}67 \leqslant \beta_1 < 1$)

$k_\beta = \ldots$ (5.16)

(если $\beta_1 < 1$)

$k_\beta' = \ldots$ (5.17)

(если $0{,}33 \leqslant \beta_1 \leqslant 0{,}67$)

$h_{2(1)} = \ldots$, мм (5.18)

$\lambda_{п(1)} = \ldots$ (5.19)

$\lambda_{л(1)} = \ldots$ (5.20)

$\xi_{(1)} = \ldots$ (5.21)

$\gamma_1 = \ldots$ (5.22)

$\gamma_2 = \ldots$ (5.23)

$k_{\delta 1} = \ldots$ (5.24)

$k_{\delta 2} = \ldots$ (5.25)

$k_\delta = \ldots$ (5.26)

$\lambda_{д(1)} = \ldots$ (5.27)

$x_1 = \ldots$ Ом (5.28)

$x_{1*} = \ldots$ о. е. (5.29)

($x_{1*} = 0{,}08 - 0{,}14$)

$\Delta b_{\delta 2} = \ldots$ (5.30)

$\Delta b_{t2} = \ldots$ (5.31)

$h_{0(2)} = \ldots$ м. (5.32)

$\lambda_{п(2)} = \ldots$ (5.33)

(идентификатор 3)

$\lambda_{п(2)} = \ldots$ (5.34)

(идентификатор 4)

$\lambda_{л(2)} = \ldots$ (5.35)

$\xi_{(2)} = \ldots$ (5.36)

$\lambda_{д(2)} = \ldots$ (5.37)

$x'_2 = \ldots$ Ом (5.39)

$x'_{2*} = \ldots$ о. е. (5.40)

(x'_{2*} = 0,1 - 0,16)

Просмотр результатов расчета закончен.

Повторить: (Да — информ. окно № 5.11?).

Печать: (Да — информ. окно № 5.10 и № 5.11?).

6. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НА ЭВМ ПОТЕРЬ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ
(шестой фрагмент программы)

Потери в асинхронных двигателях подразделяют на основные и добавочные. К основным потерям относят электрические в обмотках статора и ротора, магнитные, механические и вентиляционные.

Добавочные потери делят на добавочные потери холостого хода и добавочные потери при нагрузке.

К добавочным потерям холостого хода относят поверхностные и пульсационные.

Поверхностные — это потери в поверхностном слое коронок зубцов статора и ротора от пульсаций индукции в воздушном зазоре.

Пульсационные — это потери в стали зубцов статора и ротора от пульсаций индукции в этих зубцах.

Поверхностные и пульсационные потери возникают во всех электрических машинах, имеющих пазы, открытые в воздушный зазор. Если асинхронный двигатель спроектирован с полузакрытыми трапецеидальными пазами статора и с полузакрытыми грушевидными пазами ротора (идентификатор формы паза ротора — 4), то рассчитывают поверхностные и пульсационные потери в магнитопроводах статора и ротора:

$$\Delta p_{\text{ст.доб}} = \Delta p_{\text{пов}(1)} + \Delta p_{\text{пов}(2)} + \Delta p_{\text{пул}(1)} + \Delta p_{\text{пул}(2)}.$$

Если асинхронный двигатель спроектирован с полузакрытыми трапецеидальными пазами статора и с закрытыми грушевидными пазами ротора (идентификатор формы паза ротора —3), то учитывают только влияние раскрытия пазов статора ($b_{\text{ш}(1)}$) на ротор, то есть рассчитывают поверхностные и пульсационные потери только в магнитопроводе ротора ($\Delta p_{\text{ст.доб}} = \Delta p_{\text{пов}(2)} + \Delta p_{\text{пул}(2)}$), так как при закрытых пазах ротора поверхностные и пульсационные потери в статоре не возникают.

Добавочные потери при нагрузке для машин общего назначения учитывают приближенно. Согласно действующему стандарту, добавочные потери при номинальной нагрузке принимают равными 0,5 % от номинальной мощности на входе двигателя, а при других нагрузках их рассчитывают по формуле

$$\Delta p_{доб.} = 0{,}005 P_{1н}(I_1/I_{1н})^2 \text{ или } \Delta p_{доб} = 0{,}005\ P_1.$$

Кроме классификации потерь на основные и добавочные все виды потерь делят на три группы: постоянные, не изменяющиеся от нагрузки; пропорциональные току, пропорциональные квадрату тока.

К постоянным потерям относят основные магнитные потери, добавочные потери холостого хода, механические и вентиляционные потери.

Потерь второй группы в короткозамкнутых асинхронных двигателях нет.

В третью группу входят электрические потери в обмотках статора и ротора и добавочные потери при нагрузке. Потери, пропорциональные квадрату тока, рассчитываются в разделе «Расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя».

Информационное окно № 6.1
Расчет основных магнитных потерь (потерь в стали). Ввод исходных данных

Основные магнитные потери рассчитываются только в сердечнике статора, так как частота перемагничивания сердечника ротора в режимах, близких к номинальному, очень мала (0,5–3,5 Гц).

Число, месяц, год	...?
Ваши фамилия, инициалы	...?
Группа	...?
Руководитель, должность, звание, фамилия, инициалы	...?

Введите данные технического задания на проектирование асинхронного двигателя:

1. Тип двигателя	Асинхронный с короткозамкнутым ротором, обмотка ротора «беличья клетка» (заливка алюминием)
2. Назначение	Общего исполнения или взрывозащищенный
3. Номинальный режим работы	$S1$
4. Номинальная мощность	$P_{2н}$=... кВт
5. Номинальное напряжение	Y/Δ,... В
6. Число полюсов	$2p$ = ...
7. Базисная частота	$f_{1н}$=... Гц
8. Частоты сети, при которых рассчитываются рабочие характеристики двигателя	f_1=... Гц
9. Закон изменения напряжения или ЭДС статора в зависимости от частоты	$U_1/U_{1н}$=... $E_1/E_{1н}$=...
10. Степень защиты от воздействия окружающей среды	*IP*...
11. Способ охлаждения	*IC*...
12. Исполнение по способу монтажа	*IM*...
13. Климатические условия	....
14. Класс нагревостойкости изоляции	*F*
15. Маркировка взрывозащиты	......

Данные, необходимые для расчета основных магнитных потерь:

1. Наружный диаметр магнитопровода статора	D_a=...? м
2. Число пазов статора	Z_1=...? паз
3. Высота ярма статора	$h_{a(1)}$= ...? мм
4. Высота зубца статора	$h_{Z(1)}$=...? мм
5. Ширина зубца статора	$b_{Z(1)}$=...? мм
6. Действительное значение индукции в зубце статора	$B_{Z(1)}$=...? Тл
7. Индукция в ярме статора	B_a= ...? Тл
8. Марка электротехнической стали	...?
9. Расчетная длина воздушного зазора	l_δ=...? м
10.Намагничивающий ток	I_μ=...? А
11.Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора	x_1=...? Ом
12. Предварительное значение номинального фазного тока статора	$I_{1н.пред.}$=...? А
13. Величина воздушного зазора	δ=...? мм

14. Ширина шлица паза статора	$b_{ш(1)}$=...? мм
15. Идентификатор паза ротора: закрытый — 3, полузакрытый — 4	...?
16. Ширина шлица паза ротора	$b_{ш(2)}$=...? мм

По табл. 6.1 введите значение удельных потерь в стали с толщиной листа 0,5 мм при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц.

Таблица 6.1

Удельные потери в стали

Марка стали	Удельные потери, Вт/кг
2013	2,5
2212	2,2
2214	2
2312	1,75
2412	1,3

$P_{1,0/50}$=...? Вт/кг

Введите условную величину ширины шлица (прорези) паза ротора ($b'_{ш(2)}$).

Необходнмая информация:

— $b'_{ш(2)}$=0, если паз ротора закрытый (идентификатор 3);

—$b'_{ш(2)}$=$b_{ш(2)}$, если паз ротора полузакрытый (идентификатор 4).

$b'_{ш(2)}$=...?мм

Корректировка расчета: (Да — информ. окно № 6.1. Нет — формулы (6.1)—(6.9), информ. окно № 6.2?).

Масса стали ярма статора, кг:

$$m_a = \pi(D_a - (h_a \cdot 10^{-3}))k_c\gamma_c l_i (h_a \cdot 10^{-3}),$$

где k_c = 0,97 — коэффициент заполнения пакета сталью,

γ_c = 7,8 $\cdot$ 10^3 кг/м^3 — удельная масса стали.

В программе эта формула используется в виде:

$$m_a = 23{,}769 \cdot 10^3 (D_a - (h_a \cdot 10^{-3}))(h_a \cdot 10^{-3}) l_\delta . \qquad (6.1)$$

Масса зубцов статора, кг:

$$m_{Z(1)} = (h_{Z(1)} \cdot 10^{-3})(b_{Z(1)} \cdot 10^{-3})) \cdot Z_1 l_\delta k_c \gamma_c .$$

В программе эта формула используется в виде:

$$m_{Z(1)} = (7{,}566 \cdot 10^3 (h_{Z(1)} \cdot 10^{-3})(b_{Z(1)} \cdot 10^{-3})) \cdot Z_1 l_\delta . \qquad (6.2)$$

Основные потери в стали статора, Вт:

$$\Delta p_{\text{ст осн}} = P_{1,0/50} (f_{1н} / 50)^\beta (k_{\text{ДА}} \cdot B_a^2 m_a + k_{\text{ДZ}} B_{Z(1)}^2 m_{Z(1)}),$$

где β = 1,3—1,5 — коэффициент, учитывающий зависимость потерь в стали от частоты перемагничивания (в программе β = 1,5);

$k_{\text{дА}}$=1,6; $k_{\text{дZ}}$ =1,8 — коэффициенты, учитывающие влияние неравномерности распределения магнитного потока на потери в стали.

В программу эта формула введена в виде

$$\Delta p_{\text{ст.осн.}} = P_{1,0/50} (1{,}6 \cdot B_a^2 m_a + 1{,}8 B_{Z(1)}^2 m_{Z(1)}) (f_{1н}/50)^{1,5}. \qquad (6.3)$$

Активное сопротивление, характеризующее магнитные потери в схеме замещения, Ом:

$$r_{12} = \frac{\Delta p_{\text{ст осн.}}}{m_1 I_\mu^2} . \qquad (6.4)$$

Активное сопротивление, характеризующее магнитные потери в относительных единицах, о. е.:

$$r_{12*} = \frac{r_{12} I_{1\text{н.пред.}}}{U_{1\text{н}}} . \qquad (6.5)$$

При правильном расчете r_{12*}=0,05—0,2 о. е.

Сопротивление взаимной индукции обмоток статора и ротора, Ом:

$$x_{12} = \frac{U_{1н}}{I_{\mu}} - x_1 . \qquad (6.6)$$

Сопротивление взаимной индукции в относительных единицах, о. е.:

$$x_{12*} = \frac{x_{12} I_{1н.пред.}}{U_{1н}} . \qquad (6.7)$$

При правильном расчете x_{12*}=2—5,5 о. е.

Расчетные отношения ширины шлица (величины раскрытия паза в воздушный зазор) к значению воздушного зазора:

статор

$$\Delta b_{\delta 1} = b_{ш(1)} / \delta ; \qquad (6.8)$$

ротор

$$\Delta b_{\delta 2} = b'_{ш(2)} / \delta . \qquad (6.9)$$

Информационное окно № 6.2
Расчет поверхностных потерь

Поверхностные потери (потери в поверхностном слое коронок зубцов статора и ротора от пульсаций индукции в воздушном зазоре). Эти потери относятся к добавочным потерям холостого хода.

Введите данные, необходимые для расчета поверхностных потерь:

1. Расчетное значение индукции в воздушном зазоре	B_δ = ...? Тл
2. Зубцовое деление статора	t_1 =...? мм
3. Зубцовое деление ротора	t_2=...? мм
4. Число пазов ротора	Z_2 =...? паз.

По рис. 6.1, *б* введите в программу коэффициенты $\beta_{0(1)}=f(b'_{ш(2)}/\delta)$ и $\beta_{0(2)}=f(b_{ш(1)}/\delta)$. Если $b'_{ш(2)}=0$, то есть паз ротора закрытый (идентификатор — 3), то введите $\beta_{0(1)}=0$.

Необходимая информация:

$\Delta b_{\delta 1} = b_{ш(1)} / \delta = \ldots$

$\Delta b_{\delta 2} = b'_{ш(2)} / \delta = \ldots$

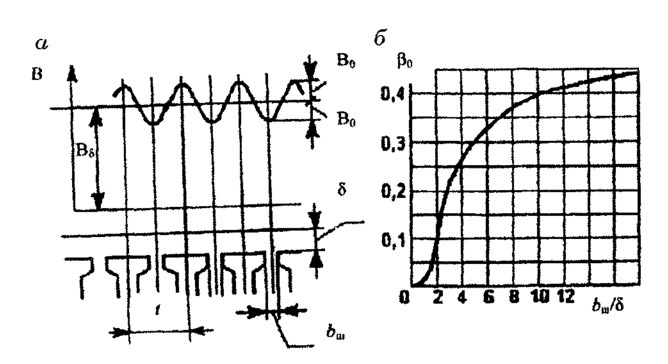


Рис. 6.1. К расчету поверхностных потерь в асинхронных машинах:
а – пульсации индукции в воздушном зазоре; *б* – зависимость $\beta_0 = f(b_ш/\delta)$

$\beta_{0(1)}=\ldots?$

$\beta_{0(2)}=\ldots?$

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 6.2. Нет — формулы (6.10) – (6.21) информ. окно № 6.3?).

Расчет коэффициента воздушного зазора k_δ:

$$\gamma_1 = \frac{(b_{ш(1)}/\delta)^2}{5+(b_{ш(1)}/\delta)}; \qquad (6.10)$$

$$\gamma_2 = \frac{(b'_{ш(2)}/\delta)^2}{5+(b'_{ш(2)}/\delta)}; \qquad (6.11)$$

$$k_{\delta 1} = t_1/(t_1 - \gamma_1 \cdot \delta)\,; \tag{6.12}$$

$$k_{\delta 2} = t_2/(t_2 - \gamma_2 \cdot \delta)\,; \tag{6.13}$$

$$k_\delta = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2}\,. \tag{6.14}$$

Амплитуды пульсаций индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов статора и ротора, Тл:

$$B_{0(1)} = \beta_{0(1)} \cdot k_\delta \cdot B_\delta\,; \tag{6.15}$$

$$B_{0(2)} = \beta_{0(2)} \cdot k_\delta \cdot B_\delta\,. \tag{6.16}$$

В режиме холостого хода скорость вращения ротора принимается равной скорости вращения магнитного поля, об/мин:

$$n = \frac{60 f_{1н}}{p} = \frac{120 f_{1н}}{2p}\,. \tag{6.17}$$

Удельные поверхностные потери (потери на 1 м^2 поверхности коронок зубцов статора и ротора), Вт/м^2:

$$p_{пов(1)} = 0{,}5 k_{01} \left(\frac{Z_2 n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (B_{0(1)} \cdot t_2)^2\,;$$

$$p_{пов(2)} = 0{,}5 k_{02} \left(\frac{Z_1 n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (B_{0(2)} \cdot t_1)^2\,,$$

где k_{01} и k_{02} — коэффициенты, учитывающие влияние обработки коронок зубцов статора и ротора на удельные потери.

Для двигателей мощностью до 160 кВт $k_{01} \approx k_{02} = 1{,}4 - 1{,}8$.

В расчете значения коэффициентов приняты: $k_{01} = k_{02} = 1{,}5$.

Поэтому

$$p_{пов(1)} = 0{,}75 \left(\frac{Z_2 n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (B_{0(1)} \cdot t_2)^2\,; \tag{6.18}$$

$$p_{пов(2)} = 0{,}75\left(\frac{Z_1 n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (B_{0(2)} \cdot t_1)^2 . \qquad (6.19)$$

Полные поверхностные потери, Вт:

статора:

$$\Delta p_{пов(1)} = p_{пов(1)}(t_1 - b_{ш(1)}) \cdot 10^{-3} \cdot Z_1 l_\delta ; \qquad (6.20)$$

ротора:

$$\Delta p_{пов(2)} = p_{пов(2)}(t_2 - b_{ш(2)}) \cdot 10^{-3} \cdot Z_2 l_\delta . \qquad (6.21)$$

Информационное окно № 6.3
Расчет пульсационных потерь в стали зубцов статора и ротора и полных магнитных потерь

Пульсационные потери (потери от пульсаций индукции в зубцах) относятся к добавочным потерям холостого хода.

Введите данные, необходимые для расчета пульсационных потерь:

1 Действительное значение индукции в среднем сечении зубца ротора	$B_{Z(2)ср}$=...? Тл
2 Расчетная высота зубца ротора	$h_{Z(2)}$ = ...?мм
3 Ширина верхней части зубца ротора	$b'_{Z(2)}$ = ...?мм
4 Ширина нижней части зубца ротора	$b''_{Z(2)}$ = ...? мм
5. Внутренний диаметр магнитопровода статора	D=...? м

Корректировка расчета (Да – информ. окно № 6.3. Нет – (формулы (6.22)–(6.30)), информ. окно № 6.4?).

Амплитуды пульсаций индукции в средних сечениях зубцов, Тл:

статора:

$$B_{пул(1)} = \left(\frac{\gamma_2 \delta}{2t_1}\right) B_{Z(1)} ; \qquad (6.22)$$

ротора:

$$B_{\text{пул}(2)} = \left(\frac{\gamma_1 \delta}{2t_2}\right) B_{Z(2)\text{ср}}. \tag{6.23}$$

Масса стали зубцов ротора, кг:

$$m_{Z(2)} = Z_2 (h_{Z(2)}\ 10^{-3})(b_{Z(2)} \cdot 10^{-3}) \cdot l_\delta k_c \gamma_c.$$

В программе эта формула используется в виде

$$m_{Z(2)} = 7{,}566 \cdot 10^3 (h_{Z(2)}\ 10^{-3})(((b'_{Z(2)} + b''_{Z(2)})/2) \cdot 10^{-3}) \cdot l_\delta Z_2. \tag{6.24}$$

Пульсационные потери в зубцах, Вт:
статора:

$$\Delta p_{\text{пул}(1)} = 0{,}11\left(\frac{Z_2 n}{1000} \cdot B_{\text{пул}(1)}\right)^2 m_{Z(1)}; \tag{6.25}$$

ротора:

$$\Delta p_{\text{пул}(2)} = 0{,}11\left(\frac{Z_1 n}{1000} \cdot B_{\text{пул}(2)}\right)^2 m_{Z(2)}. \tag{6.26}$$

Сумма добавочных потерь холостого хода в асинхронном двигателе, Вт:

$$\Delta p_{\text{ст.доб.}} = \Delta p_{\text{пов}(1)} + \Delta p_{\text{пов}(2)} + \Delta p_{\text{пул}(1)} + \Delta p_{\text{пул}(2)}. \tag{6.27}$$

Проверка правильности расчета добавочных потерь

$$\Delta p_{\text{ст доб.}} / \Delta p_{\text{ст.осн.}}. \tag{6.28}$$

Обычно добавочные потери составляют 0,12—0,3 от основных.

Полные магнитные потери (потери в стали) асинхронного двигателя, Вт:

$$\Delta p_{ст} = \Delta p_{ст.осн.} + \Delta p_{ст.доб.} \quad (6.29)$$

Коэффициент для расчета механических потерь (степень защиты IP44, IP54, $2p \geq 4$):

$$K''_T = 1{,}3(1 - D_a). \quad (6.30)$$

Информационное окно № 6.4
Расчет механических и вентиляционных потерь

Введите соответствующее численное значение коэффициента $K_т$ или $K'_т$, или $K''_т$ (табл. 6.2).

Необходимая для принятия решения информация:

— число полюсов $2p$ = ...

— степень защиты IP...

— наружный диаметр статора D_a = ..., м.

— коэффициент (степень защиты IP44,IP54 и $2p>4$) $K''_т$ = ...

Таблица 6.2.

Значения коэффициентов $K_т$, $K'_т$, $K''_т$

	Степень защиты IP23				Степень защиты IP44, IP54	
	$D_a \leq 0{,}25$м		$D_a > 0{,}25$м			
	$2p=2$	$2p \geq 4$	$2p=2$	$2p \geq 4$	$2p=2$	$2p \geq 4$
$K_т$	5	6	6	7	0	0
$K'_т$	0	0	0	0	1	0
$K''_т$	0	0	0	0	0	Формула (6.30)

При вводе численного значения коэффициента $K_т$, или $K'_т$, или $K''_т$ в остальные информационные поля ввести нули.

$K_т$=...?

$K'_т$=...?

$K''_т = \ldots ?$

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 6.4. Нет — (формулы (6.31)–(6.33), информ. окно № 6.5?)).

Механические и вентиляционные потери, Вт (степень защиты IP23)

$$\Delta p_{мех} = K_т (n/1000)^2 (10D)^3 . \quad (6.31)$$

Механические и вентиляционные потери, Вт (степень защиты IP44, IP54, $2p = 2$)

$$\Delta p_{мех} = K'_т (n/10)^2 D_a^{\ 4} . \quad (6.32)$$

Механические и вентиляционные потери, Вт (степень защиты IP44, IP54, $2p \geq 4$)

$$\Delta p_{мех} = K''_т (n/10)^2 D_a^{\ 4} . \quad (6.33)$$

Информационное окно № 6.5
Расчет тока холостого хода и коэффициента мощности холостого хода

Введите данные, необходимые для расчета:

Активное сопротивление фазы статора при расчетной температуре	$r_1 = \ldots ?$ Ом

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 6.5. Нет — формулы (6.34) — (6.38), информ. окно № 6.6?).

Электрические потери в статоре при холостом ходе, Вт:

$$\Delta p_{э10} = m_1 \cdot I_\mu^2 \cdot r_1 . \quad (6.34)$$

Активная составляющая тока холостого хода, А:

$$I_{0\,а} = \frac{\Delta p_{ст} + \Delta p_{мех} + \Delta p_{э10}}{m_1 U_{1н}}. \qquad (6.35)$$

Ток холостого хода, А:

$$I_о = \sqrt{I_{о.а}^{\;2} + I_\mu^2}. \qquad (6.36)$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos\varphi_о = I_{о.а} / I_о. \qquad (6.37)$$

Потери, не изменяющиеся при изменении скольжения, кВт:

$$\Delta p_{пост} = (\Delta p_{ст} + \Delta p_{мех})\, 10^{-3}. \qquad (6.38)$$

Информационное окно № 6.6
Расчет потерь асинхронного двигателя закончен
Проверка введенных данных

Проверьте данные, введенные при расчете:

Число, месяц, год	...
Ваши фамилия, инициалы	...
Группа	...
Руководитель, должность, звание, фамилия, инициалы	...

Данные технического задания на проектирование асинхронного двигателя:

1. Тип двигателя	Асинхронный с короткозамкнутым ротором, обмотка ротора «беличья клетка» (заливка алюминием)
2. Назначение	Общего исполнения или взрывозащищенный

3. Номинальный режим работы	$S1$
4. Номинальная мощность	$P_{2н}$=... кВт
5. Номинальное напряжение	Y/Δ,... В
6. Чнсло полюсов	$2p$ = ...
7. Базисная частота	$f_{1н}$=... Гц
8. Частоты сети, прн которых рассчитываются рабочне характернстнки двигателя	f_1=... Гц
9. Закон изменення напряжения или ЭДС статора в зависнмости от частоты	$U_1/U_{1н}$=... $E_1/E_{1н}$=...
10. Степень защиты от воздействня окружающей среды	IP...
11. Способ охлаждення	IC...
12. Исполнение по способу монтажа	IM...
13. Клнматические условия	....
14. Класс нагревостойкости изоляцнн	F
15. Маркировка взрывозащиты	......

Данные, введенные в процессе расчета:

1. Наружный диаметр магнитопровода статора	D_a=... м
2. Чнсло пазов статора	Z_1=... паз
3. Высота ярма статора	$h_{a(1)}$=...мм
4. Высота зубца статора	$h_{z(1)}$=...мм
5. Шнрнна зубца статора	$b_{z(1)}$=... мм
6. Действительное значение ннлукции в зубце статора	$B_{Z(1)}$=... Тл
7. Индукция в ярме статора	B_a=... Тл
8. Марка электротехнической стали	....
9. Расчетная длина воздушного зазора	l_δ=... м
10. Намагничнвающий ток	I_μ=... А
11. Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора	x_1=... Ом
12. Предварительное значение номинального фазного тока статора	$I_{1н.пред.}$=...А
13. Велнчина воздушного зазора	δ = ... мм
14. Шнрнна шлица паза статора	$b_{ш(1)}$=... мм
15. Идентификатор паза ротора: (закрытый — 3, полузакрытый — 4)	.....
16. Ширина шлнца (прорези) паза ротора	$b_{ш(2)}$=... мм

17. Условная ширнна шлица (прорези) паза ротора	$b'_{ш(2)}=0$ (идентификатор 3) $b'_{ш(2)}=b_{ш(2)}=\ldots$ мм (ндентифнкатор 4)
18. Удельные потери в стали	$P_{1.0/50}=\ldots$ Вт/кг
19. Расчетное значение индукции в воздушном зазоре	$B_\delta=\ldots$ Тл
20. Зубцовое деленне статора	$t_1=\ldots$ мм
21. Зубцовое деленне ротора	$t_2=\ldots$ мм
22.Число пазов ротора	$Z_2=\ldots$ паз
23. Коэффициент $в_{0(1)}$	$в_{0(1)}=\ldots$
24. Коэффициент $в_{0(2)}$	$в_{0(2)}=\ldots$
25. Действнтельное значение индукции в среднем сеченни зубца ротора	$B_{Z(2)ср}=\ldots$ Тл
26. Расчетная высота зубца ротора	$h_{z(2)}=\ldots$ мм
27. Шнрнна верхней частн зубца ротора	$b'_{z(2)}=\ldots$мм
28. Шнрнна нижней части зубца ротора	$b''_{z(2)}=\ldots$ мм
29. Внутреннний диаметр магнитопровода статора	$D=\ldots$ м
30. Коэффициент $K_т$ (степень защиты IP23)	$K_т=\ldots$
31. Коэффициент $K'_т$ (степень защиты IP44, IP54) ($2p=2$)	$K'_т=\ldots$
32. Коэффициент $K''_т$ (степень защиты IP44, IP54) ($2p\geqslant 4$)	$K''_т=\ldots$
33. Активное сопротивление фазы статора при расчетной температуре	$r_1=\ldots$ Ом

Просмотр введенных данных закончен.

Повторить: (Да – информ. окно № 6.6?).

Результаты расчеты: (Да — информ. окно № 6.7?).

Информационное окно № 6.7
Результаты расчета потерь в асинхронном двигателе

$m_a=\ldots$ кг	(6.1)	$r_{12*}=\ldots$о.е.	(6.5)
$m_{Z(1)}=\ldots$ кг	(6.2)	($r_{12*}=0{,}05$–$0{,}2$)	
$\Delta p_{ст.осн.}=\ldots$ Вт	(6.3)	$x_{12}=\ldots$Ом	(6.6)
$r_{12}=\ldots$ Ом	(6.4)	$x_{12*}=\ldots$о.е.	(6.7)

$(x_{12*}=2-5{,}5)$

$\Delta b_{\delta 1}=\ldots$ (6.8)

$\Delta b_{\delta 2}=\ldots$ (6.9)

$\gamma_1=\ldots$ (6.10)

$\gamma_2=\ldots$ (6.11)

$k_{\delta 1}=\ldots$ (6.12)

$k_{\delta 2}=\ldots$ (6.13)

$k_{\delta}=\ldots$ (6.14)

$B_{0(1)}=\ldots$ Тл (6.15)

$B_{0(2)}=\ldots$ Тл (6.16)

$n=\ldots$ об/мин (6.17)

$p'_{пов(1)}=\ldots$ Вт/м^2 (6.18)

$p'_{пов(2)}=\ldots$ Вт/м^2 (6.19)

$\Delta p_{пов(1)}=\ldots$ Вт (6.20)

$\Delta p_{пов(2)}=\ldots$ Вт (6.21)

$B_{пу.л(1)}=\ldots$ Тл (6.22)

$B_{пу.л(2)}=\ldots$ Тл (6.23)

$m_{Z(2)}=\ldots$ кг (6.24)

$\Delta p_{пу.л(1)}=\ldots$ Вт (6.25)

$\Delta p_{пу.л(2)}=\ldots$ Вт (6.26)

$\Delta p_{ст.доб}=\ldots$ Вт (6.27)

$\Delta p_{ст.доб.}/\Delta p_{ст.осн.}=\ldots$ (6.28)

$\Delta p_{ст}=\ldots$ Вт (6.29)

$K''_{т}=\ldots$ (6.30)

$\Delta p_{мех.}=\ldots$ Вт (6.31)

(IP23, $Da \leqslant 0{,}25$ м, $2p \geqslant 2$
и $Da > 0{,}25$ м, $2p \geqslant 2$)

$\Delta p_{мех}=\ldots$Вт (IP44, $2p=2$) (6.32)

$\Delta p_{мех.}=\ldots$Вт (IP44, $2p \geqslant 4$) (6.33)

$\Delta p_{э10.}=\ldots$ Вт (6.34)

$I_{о.а.}=\ldots$ А (6.35)

$I_{о.}=\ldots$ А (6.36)

$\cos \varphi_{о.}=\ldots$ (6.37)

$\Delta p_{пост.}=\ldots$кВт (6.38)

Просмотр результатов расчета закончен.

Повторить: (Да — информ. окно № 6.7?).

Печать: (Да — информ. окно № 6.6 и № 6.7?).

7. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НА ЭВМ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ
(седьмой фрагмент программы)

Расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя производится по Т-образной электрической схеме замещения (рис. 7.1, *а*), так как только при использовании этой схемы замещения возможен расчет фазной ЭДС статора E_1, основного магнитного потока $Ф_{расч}$ и тока холостого хода $I_{о.расч.}$ при изменении нагрузки на валу. Также в нижеприведенном алгоритме заложена возможность расчета рабочих характеристик двигателя при различных значениях напряжения и частоты сети.

Задача:

а) рассчитать и построить следующие рабочие характеристики для базисных $U_{1н}$ и $f_{1н}$:

$$P_1,\ I_1,\ I'_2,\ \cos\varphi,\ \eta,\ S,\ \Omega_2,\ M_{эм},\ M_2 = f(P_2);$$

б) определить номинальные данные асинхронного двигателя (данные, соответствующие заданной в техническом задании номинальной мощности на валу $P_{2Н}$ для базисных $U_{1н}$ и $f_{1н}$):

$$P_{1н},\ I_{1н},\ I'_{2н},\ \cos\varphi_н,\ \eta_н,\ S_н,\ \Omega_{2н},\ M_{эм.н},\ M_{2н};$$

в) если в техническом задании заданы напряжения и частоты сети, отличающиеся от базисных, то рассчитать рабочие характеристики для этих напряжений и частот;

г) рассчитать и построить зависимости:

$$E_1,\ K_E,\ Ф_{расч},\ I_{о.расч} = f(S).$$

В асинхронном частотно-регулируемом электроприводе частота f_1 и напряжение U_1 связаны определенной функциональной зависимостью.

Возможны следующие основные случаи регулирования скорости:

— при постоянном электромагнитном моменте ($M_{эм}$ = const);

— при постоянной мощности на валу (P_2 = const);

— при электромагнитном моменте, пропорциональном квадрату частоты ($M_{эм} \equiv f_1^2$).

Если ставится задача, чтобы двигатель работал при разных частотах с практически постоянными значениями КПД, cos φ, перегрузочной способностью и с постоянным абсолютным скольжением, то при ненасыщенном магнитопроводе необходимо регулировать напряжение по следующему закону:

$$\frac{U_1}{U_{1н}} = \frac{f_1}{f_{1н}}\sqrt{\frac{M_{эм(1)}}{M_{эм}}},$$

где $U_{1н}$, $M_{эм}$ — напряжение и электромагнитный момент, соответствующие частоте $f_{1н}$;

U_1, $M_{эм(1)}$ — то же при частоте f_1.

Если $M_{эм} = M_c$ = const, т. е. момент статического сопротивления механизма M_c не зависит от значения скорости, то

$$\frac{U_1}{U_{1н}} = \frac{f_1}{f_{1н}}, \quad \text{откуда} \quad U_1 = \frac{f_1}{f_{1н}} U_{1н}.$$

При использовании закона изменения напряжения пропорционально частоте амплитуда основного магнитного потока, также изменяется. Поэтому более точным является закон:

$$\frac{E_1}{E_{1н}} = \frac{f_1}{f_{1н}}, \quad \text{откуда} \quad E_1 = \frac{f_1}{f_{1н}} E_{1н},$$

где $E_{1н} = 4{,}44\, k_{об1}\, W_1\, f_{1н}\, \Phi_m$.

Этот закон позволяет поддерживать амплитуду основного магнитного потока постоянной (Φ_m =const). Закон изменения напряжения при этом способе регулирования вычисляется по уравнению

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + (r_1 + jx_1)\dot{I}_1.$$

Действующее значение напряжения U_1 может быть рассчитано по Т-образной схеме замещения. При частотах $f_1/f_{1н}<(0{,}2\div0{,}3)$ индуктивным сопротивлением $x_1=2\pi f_1 L_{\sigma 1}$ можно пренебречь, тогда уравнение преобразуется к виду $\dot{U}_1=-\dot{E}_1+r_1\dot{I}_1$.

При вентиляторной нагрузке $M_C \equiv \Omega^2$, поэтому напряжение регулируют по закону

$$\frac{U_1}{U_{1н}}=\left(\frac{f_1}{f_{1н}}\right)^2, \quad \text{откуда} \quad U_1=\left(\frac{f_1}{f_{1н}}\right)^2 U_{1н}.$$

Для нагрузки с постоянной мощностью:

$$\frac{U_1}{U_{1н}}=\sqrt{\frac{f_1}{f_{1н}}}, \quad \text{откуда} \quad U_1=\sqrt{\frac{f_1}{f_{1н}}}\,U_{1н}.$$

Применение подобного соотношения при регулировании скорости асинхронного двигателя выше основной, где наиболее часто используется режим постоянства мощности, требует превышения напряжения выше номинального значения и, соответственно, завышения установленной мощности преобразователя частоты пропорционально $\sqrt{\frac{f_1}{f_{1н}}}$. Практически это исключено и частотное регулирование скорости выше основной выполняется при $U_1 = U_{1н} = \text{const}$. При этом перегрузочная способность асинхронного двигателя по моменту уменьшается обратно пропорционально $\sqrt{\frac{f_1}{f_{1н}}}$.

При расчете рабочих характеристик для напряжений и частот сети, отличающихся от базисных $U_{1н}$ и $f_{1н}$, вводятся следующие корректирующие коэффициенты:

$\alpha_U = U_1/U_{1н}$ — относительное фазное напряжение статора;

$\alpha_f = f_1/f_{1н}$ — относительная частота напряжения статора;

$\alpha_{ст} = (f_1/f_{1н})^{1,5}$ — коэффициент коррекции величины основных магнитных потерь при изменении частоты;

$\alpha_{пов} = \alpha_{ст}$ — коэффициент коррекции величины поверхностных потерь при изменении частоты;

$\alpha_{пул} = (f_1/\ f_{1н})^2$ — коэффициент коррекции величины пульсационных потерь при изменении частоты;

$\alpha_{мех} = \alpha_f$ — коэффициеит коррекции механических потерь;

$\alpha_ф = (\alpha_U\ /\alpha_f)^2$— коэффициент коррекции магнитных потерь при изменеиии магнитного потока;

$\alpha_r = \alpha_{ст}\ \alpha_ф\ /\alpha_U\ ^2$— коэффициент коррекции активного сопротивления контура намагничивания.

При расчете фазного тока статора I_1 в функции скольжения Т-образная схема замещения (см. рис. 7.1, *а*) преобразуется в пассивный двухполюсник с последовательным соединением злементов (рис. 7.1, *б*, *в*, *г*):

Начальная фаза $U_{1н}$ принимается равной нулю ($\dot{U}_{1н} = U_{1н}e^{j\psi_U} = U_{1н}$, где $\psi_u = 0$).

$$\underline{Y}_m = \frac{1}{\underline{Z}_{12}} = \frac{\alpha_r r_{12}}{(\alpha_r r_{12})^2 + (\alpha_f x_{12})^2} - j\frac{\alpha_f x_{12}}{(\alpha_r r_{12})^2 + (\alpha_f x_{12})^2} = g_m - jb_m;$$

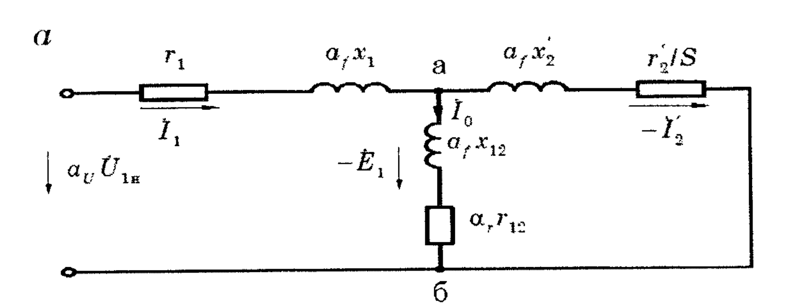
$$\underline{Y}'_{2S} = \frac{1}{\underline{Z}'_{2S}} = \frac{r'_2/S}{\left(\frac{r'_2}{S}\right)^2 + (\alpha_f x'_2)^2} - j\frac{\alpha_f x'_2}{\left(\frac{r'_2}{S}\right)^2 + (\alpha_f x'_2)^2} = g'_{2S} - jb'_{2S};$$

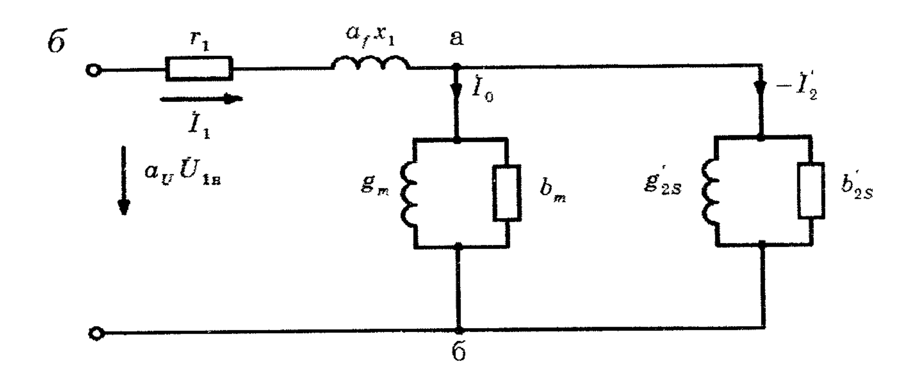
$$\underline{Y}_S = \underline{Y}_m + \underline{Y}'_{2S} = (g_m + g'_{2S}) - j(b_m + b'_{2S}) = g_S - jb_S;$$

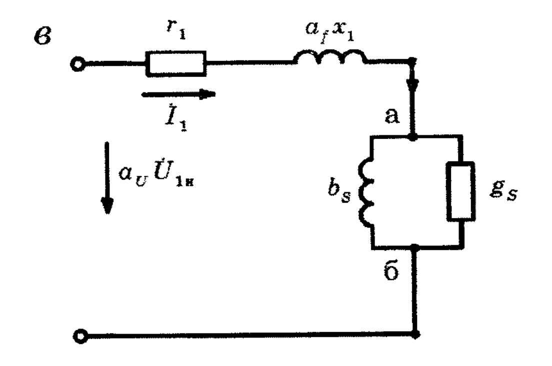
$$\underline{Z}_S = \frac{1}{Y'_S} = \frac{g_S}{g_S^2 + b_S^2} + j\frac{b_S}{g_S^2 + b_S^2} = r_S + jx_S;$$

$$\underline{Z}_\Sigma = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_S = (r_1 + r_S) + j(\alpha_f x_1 + x_S) = r_\Sigma + jx_\Sigma;$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\alpha_U U_{1H}}{\underline{Z}_\Sigma} = \frac{\alpha_U U_{1H} r_\Sigma}{r_\Sigma^2 + x_\Sigma^2} - j\frac{\alpha_U U_{1H} x_\Sigma}{r_\Sigma^2 + x_\Sigma^2} = I_{1a} - jI_{1p};$$


а
r_1
$a_f x_1$
а
$a_f x_2'$
r_2'/S
$\dot{I}_1$
$\dot{I}_0$
$a_f x_{12}$
$-\dot{I}_2'$
$a_U \dot{U}_{1н}$
$-\dot{E}_1$
$\alpha_r r_{12}$
б


б
r_1
$a_f x_1$
а
$\dot{I}_0$
$-\dot{I}_2'$
$\dot{I}_1$
$a_U \dot{U}_{1н}$
g_m
b_m
g_{2S}'
b_{2S}'
б


в
r_1
$a_f x_1$
$\dot{I}_1$
а
$a_U \dot{U}_{1н}$
b_S
g_S
б

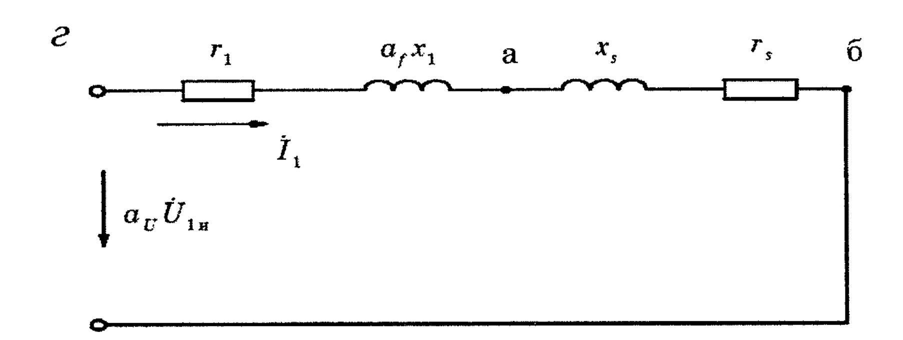


Рис. 7.1. Преобразование Т-образной электрической схемы замещения асинхронного двигателя при расчете рабочих характеристик

$$\dot{U}_{ав} = -\dot{E}_1 = \alpha_U U_{1н} - Z_1 \dot{I}_1 = \alpha_U U_{1н} - (r_1 + j\alpha_f x_1)(I_{1а} - jI_{1р}) = U_а - jU_{ср},$$

где

$$U_а = \alpha_U U_{1н} - (r_1 I_{1а} + \alpha_f x_1 I_{1р}) = \alpha_U U_{1н} - U_{са},$$

$$U_{ср} = \alpha_f x_1 I_{1а} - r_1 I_{1р},$$

$$U_{са} = r_1 I_{1а} + \alpha_f x_1 I_{1р}.$$

$$\dot{I}_{о.расч} = \frac{\dot{U}_{аб}}{Z'_{12}} = \frac{U_а \alpha_r r_{12} - U_{ср} \alpha_f x_{12}}{(\alpha_r r_{12})^2 + (\alpha_f x_{12})^2} - j\frac{U_{ср} \alpha_r r_{12} + U_а \alpha_f x_{12}}{(\alpha_r r_{12})^2 + (\alpha_f x_{12})^2} = I_{оа.расч} - jI_{ор.расч}.$$

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{U}_{аб}}{Z'_{2S}} = \frac{(U_а r'_2/S) - U_{ср} \alpha_f x'_2}{(r'_2/S) + (\alpha_f x'_2)^2} - j\frac{(U_{ср} r'_2/S) + U_а \alpha_f x'_2}{(r'_2/S) + (\alpha_f x'_2)^2} = I'_{2а} - jI'_{2р}.$$

При расчете электрических величин по Т-образной схеме замещения начальная фаза напряжения принята равной нулю.

Информационное окно № 7.1
Расчет и оптимизация рабочих характеристик асинхронного двигателя. Ввод исходных данных

Число, месяц, год	...?
Ваши фамилия, инициалы	...?
Группа	...?
Руководитель, должность, звание, фамилия, инициалы	...?

Введите данные технического задания на проектирование асинхронного двигателя:

1. Тип двигателя	Асинхронный с короткозамкнутым ротором, обмотка ротора «беличья клетка» (заливка алюминием)
2. Назначение	Общего исполнения или взрывозащищенный
3. Номинальный режим работы	$S1$
4. Номинальная мощность	$P_{2н}$=... кВт
5. Номинальное напряжение	Y/Δ,... В
6. Число полюсов	$2p$ = ...
7. Базисная частота	$f_{1н}$=... Гц
8. Частоты сети, при которых рассчитываются рабочие характеристики двигателя	f_1=... Гц
9. Закон изменения напряжения или ЭДС статора в зависимости от частоты	$U_1/U_{1н}$=... $E_1/E_{1н}$=...
10. Степень защиты от воздействия окружающей среды	*IP*...
11. Способ охлаждения	*IC*...
12. Исполнение по способу монтажа	*IM*...
13. Климатические условия	....
14. Класс нагревостойкости изоляции	*F*
15. Маркировка взрывозащиты	......

Введите данные, необходимые для расчета:

1. Предварительное значение номинального фазного тока статора	$I_{1н\ пред}$ =...? А
2. Предварительное значение номинального КПД	$\eta_{н\ пред}$ =...? о. е.
3. Предварительное значение номинального коэффициента мощности	$\cos\varphi_{н.пред.}$ =...? о. е.
4. Фиктивное активное сопротивление, характеризующее магнитные потери	r_{12}=...? Ом
5. Сопротивление взаимоиндукции	x_{12}=...? Ом
6. Активное сопротивление фазы обмотки статора при расчетной температуре	r_1=...? Ом
7. Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора	x_1=...? Ом
8. Приведенное к статору активное сопротивление фазы обмотки ротора при расчетной температуре	r'_2=...? Ом
9. Приведенное к статору индуктивиое сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора	x'_2=...? Ом
10. Намагничивающий ток	I_μ =...? А
11. Обмоточный коэффициент обмотки статора	$k_{об1}$=...?
12. Число витков в фазе статора	W_1=...? вит.
13. Фазное напряжение, при котором ведется расчет рабочих характеристик	U_1=...?В
14. Частота напряжения статора, при которой ведется расчет рабочих характеристик	f_1=...?Гц
15. Основные потери в стали при $f_{1н}$	$\Delta p_{ст\ осн.}$=...? Вт
16. Поверхностные потери статора при $f_{1н}$	$\Delta p_{пов.(1)}$=...? Вт
17. Поверхностные потери ротора при $f_{1н}$	$\Delta p_{пов\ (2)}$=...? Вт
18. Пульсационные потери в зубцах статора при $f_{1н}$	$\Delta p_{пул.(1)}$=...? Вт
19. Пульсационные потери в зубцах ротора при $f_{1н}$	$\Delta p_{пул.(2)}$=...? Вт
20. Механические потери при $f_{1н}$	$\Delta p_{мех.}$=...? Вт

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 7.1. Нет — формулы (7.1)—(7.14), информ. окно № 7.2?).

Блок проверок правильности расчета и ввода исходных данных

Расчет корректирующих коэффициентов

Перед выполнением расчета рабочих характеристик в программе предусмотрена проверка правильности расчета параметров Т-образной электрической схемы замещения асинхронного двигателя:

При проверке правильности расчета параметров Т-образной электрической схемы замещеиия асинхронного двигателя все параметры переводятся в относительные единицы (о. е.):

$$r_{12*} = (r_{12} \cdot I_{1н\,пред.})/U_{1н}; \quad (7.1)$$

$$x_{12*} = (x_{12} \cdot I_{1н.пред.})/U_{1н}; \quad (7.2)$$

$$r_{1*} = (r_1 \cdot I_{1н.пред.})/U_{1н}; \quad (7.3)$$

$$r'_{2*} = (r'_2 \cdot I_{1н\,пред.})/U_{1н}; \quad (7.4)$$

$$x_{1*} = (x_1 \cdot I_{1н.пред.})/U_{1н}; \quad (7.5)$$

$$x'_{2*} = (x'_2 \cdot I_{1н.пред.})/U_{1н}; \quad (7.6)$$

$$(r_{1*} \cdot x_{12*} - r_{12*} \cdot x_{1*}) = \ldots \quad (7.7)$$

Конструктивный коэффициент приведенного асинхронного двигателя:

$$C'_м = (2pm_1W_1k_{об1})/(2\sqrt{2}). \quad (7.8)$$

Относительное фазное напряжение статора

$$\alpha_U = U_1/\,U_{1н}\,. \quad (7.9)$$

Относительная частота напряжения статора

$$\alpha_f = f_1 / f_{1н}. \qquad (7.10)$$

Коэффициент коррекции величины основных магнитных потерь при изменении частоты

$$\alpha_{ст} = (f_1 / f_{1н})^{1,5}. \qquad (7.11)$$

Коэффициент коррекции величины пульсационных потерь при изменении частоты

$$\alpha_{пул} = (f_1 / f_{1н})^2. \qquad (7.12)$$

Коэффициент коррекции магнитных потерь при изменении магнитного потока

$$\alpha_ф = (\alpha_U / \alpha_f)^2. \qquad (7.13)$$

Коэффициент коррекции активного сопротивления контура намагничивания

$$\alpha_r = \alpha_{ст} \alpha_ф / \alpha_U^{\ 2}. \qquad (7.14)$$

Информационное окно № 7.2
Проверка правильности расчета параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя

Проверьте значеиия параметров Т-образной схемы замещения при $U_{1н}$ и $f_{1н}$:

Значение параметра, о.е.	Рекомендуемый диапазон, о.е.
r_{12*} = ...	0,05–0,2
x_{12*} = ...	2–5,5
r_{1*} = ...	0,01–0,07
r'_{2*} = ...	0,01–0,07
x_{1*} = ...	0,08–0,14
x'_{2*} = ...	0,08–0,16
$(r_{1*} \cdot x_{12*} - r_{12*} \cdot x_{1*})$ = ...	>0

Конструктивный коэффициент приведенного асинхронного двигателя $C'_м$ = ...

Корректирующие коэффициенты при базисных $U_{1н}$ = ...В, $f_{1н}$=....Гц.

α_U	$\alpha_f = \alpha_{мех}$	$\alpha_{ст} = \alpha_{пов}$	$\alpha_{пул}$	$\alpha_{Ф}$	α_r

Корректировка расчета: (Да — информ. окно № 7.1. Нет — формулы (7.15)—(7.58), информ. окно № 7.3).

Расчет рабочих характеристик

В пояснительной записке приводится подробный расчет рабочих характеристик для скольжения $S_{н.пред.} = r'_{2*}$ при базисных значениях $U_{1н}$ и $f_{1н}$.

Для остальных значений скольжений данные расчета представляются в табличной форме. Точному значению номинального скольжения $S_н$ должна соответствовать приведенная в техническом задании номинальная мощность $P_{2н}$ при $U_{1н}$ и $f_{1н}$.

Расчет параметров схем замещения (см. рис. 7.1, *б*, *в*, *г*) необходимо проводить, учитывая не менее шести знаков после запятой.

Если в техническом задании дополнительно заданы значения фазных напряжений и частот, отличающиеся от базисных $U_{1н}$ и $f_{1н}$, то расчет рабочих характеристик проводится и для дополнительно заданных значений напряжений и частот. В этом случае за номинальный принимается режим при $M_{эм} = M_{эм.н}$, где $M_{эм.н}$ — номинальный электромагнитный момент при $U_{1н}$ и $f_{1н}$.

Для расчета рабочих характеристик организуется цикл с постоянным шагом приращения скольжения

$$T = 0{,}2\ S_{н.пред.} = 0{,}2\ r'_{2*}. \quad (7.15)$$

В этом случае после шестого шага расчета рабочих характеристик текущее значение скольжения становится больше номинального, что позволяет провести поиск номинального режима.

Расчет начинается со скольжения S = 0,2 $S_{\text{н.пред.}}$, вычисляют все координаты точек рабочих характеристик на первых шести шагах (N=6).

Параметры схемы замещения (см. рис. 7.1, *б*), (точность расчета — не менее шести знаков после запятой), См:

$$g_m=\alpha_r r_{12}/((\alpha_r r_{12})^2+(\alpha_f x_{12})^2); \quad (7.16)$$

$$b_m=\alpha_f x_{12}/((\alpha_r r_{12})^2+(\alpha_f x_{12})^2); \quad (7.17)$$

$$g'_{2s}=(r'_2/S)/((r'_2/S)^2+(\alpha_f x'_2)^2); \quad (7.18)$$

$$b'_{2s}=(\alpha_f x'_2)/((r'_2/S)^2+(\alpha_f x'_2)^2). \quad (7.19)$$

Параметры схемы замещения, (см. рис. 7.1, *в*):

$$g_S = g_m + g'_{2s}; \quad (7.20)$$

$$b_S = b_m + b'_{2s}. \quad (7.21)$$

Параметры схемы замещения, Ом (см.рис. 7.1, *г*):

$$r_S = g_s/(g^2_s + b^2_s); \quad (7.22)$$

$$x_S = b_s/(g^2_s + b^2_s); \quad (7.23)$$

$$r_\Sigma = r_1 + r_s; \quad (7.24)$$

$$x_\Sigma = \alpha_f x_1 + x_s. \quad (7.25)$$

Активная составляющая фазного тока статора, А:

$$I_{1\text{а}} = \alpha_U U_{1\text{н}} r_\Sigma/(r^2_\Sigma + x^2_\Sigma). \quad (7.26)$$

Реактивная составляющая фазного тока статора, А:

$$I_{1р}=\alpha_U U_{1н} x_\Sigma/(r_\Sigma^2+x_\Sigma^2). \qquad (7.27)$$

Действующий фазный ток статора, А:

$$I_1=\sqrt{I_{1а}^2+I_{1р}^2}. \qquad (7.28)$$

Активная составляющая падения напряжения в фазе статора, В:

$$U_{са}= r_1 I_{1а}+\alpha_f x_1 I_{1р}. \qquad (7.29)$$

Реактивная составляющая падения напряжения в фазе статора, В:

$$U_{ср}= \alpha_f x_1 I_{1а}-r_1 I_{1р}. \qquad (7.30)$$

Падение напряжения в фазе статора, В:

$$U_с=\sqrt{U_{са}^2+U_{ср}^2}. \qquad (7.31)$$

Активная составляющая напряжения $U_{ав}$ контура намагничивания Т-образной схемы замещения, В:

$$U_а= \alpha_U U_{1н}-U_{са}. \qquad (7.32)$$

Действующее напряжение контура намагничивания (действующая фазная ЭДС статора), В:

$$U_{ав}=E_1=\sqrt{U_а^2+U_{ср}^2}. \qquad (7.33)$$

Коэффициент

$$K_E= E_1/(\alpha_U U_{1н}). \qquad (7.34)$$

Основной магнитный поток, Вб:

$$\Phi_{расч}= E_1/(4{,}44 k_{об1} W_1 \alpha_f f_{1н}). \qquad (7.35)$$

Активная составляющая тока холостого хода, А:

$$I_{\text{оа расч}} = (U_{\text{а}}\,\alpha_r\,r_{12} - U_{\text{ср}}\,\alpha_f\,x_{12})/((\alpha_r\,r_{12})^2+(\alpha_f\,x_{12})^2). \qquad (7.36)$$

Реактивная составляющая тока холостого хода, А:

$$I_{\text{ор.расч}} = (U_{\text{ср}}\,\alpha_r r_{12} + U_{\text{а}}\,\alpha_f\,x_{12})/((\alpha_r\,r_{12})^2+(\alpha_f\,x_{12})^2). \qquad (7.37)$$

Действующий ток холостого хода, А:

$$I_{\text{о.расч}} = \sqrt{I^2_{\text{оа.расч}} + I^2_{\text{ор.расч}}}. \qquad (7.38)$$

Активная составляющая приведенного фазного тока ротора, А:

$$I'_{2\text{а}} = ((U_{\text{а}}\,r'_2/S) - U_{\text{ср}}\,\alpha_f x'_2)/((r'_2/S)^2+(\alpha_f\,x'_2)^2). \qquad (7.39)$$

Реактивная составляющая приведенного фазного тока ротора, А:

$$I'_{2\text{р}} = ((U_{\text{ср}}\,r'_2/S)+U_{\text{а}}\,\alpha_f x'_2)/((r'_2/S)^2+(\alpha_f\,x'_2)^2). \qquad (7.40)$$

Приведенный действующий фазный ток ротора, А:

$$I'_2 = \sqrt{(I'_{2\text{а}})^2+(I'_{2\text{р}})^2}. \qquad (7.41)$$

Предварительное значение активной мощности на входе двигателя, Вт:

$$P_{1\text{пред}} = m_1\alpha_U U_{1\text{н}} I_{1\text{а}}. \qquad (7.42)$$

Коэффициент мощности

$$\cos\varphi = I_{1\text{а}} / I_1. \qquad (7.43)$$

Электромагнитный момент, Н·м:

$$M_{\text{эм}} = C'_{\text{м}}\,\Phi_{\text{расч}} I'_{2\text{а}}. \qquad (7.44)$$

Электрические потери в обмотке статора, Вт:

$$\Delta\,p_{\text{э}1} = m_1 r_1 I_1^2. \qquad (7.45)$$

Электрические потери в обмотке ротора, Вт:

$$\Delta p_{э2} = m_1 r'_2 (I'_2)^2. \tag{7.46}$$

Полные магнитные потери в асинхронном двигателе, Вт:

$$\Delta p_{ст.\Sigma} = \alpha_ф (\alpha_{ст} (\Delta p_{ст.осн} + \Delta p_{пов(1)} + \Delta p_{пов(2)}) + \alpha_{пул} (\Delta p_{пул(1)} + \Delta p_{пул(2)})). \tag{7.47}$$

Добавочные потери, Вт:

$$\Delta p_{доб} = 0{,}005 \alpha_ф P_{1\ пред} (1 - S). \tag{7.48}$$

Механические потери, Вт:

$$\Delta p_{мех.расч} = \alpha_f \Delta p_{мех} (1 - S). \tag{7.49}$$

Суммарные потери в асинхронном двигателе, Вт:

$$\sum \Delta p = \Delta p_{э1} + \Delta p_{э2} + \Delta p_{ст\,\Sigma} + \Delta p_{доб} + \Delta p_{мех.расч}. \tag{7.50}$$

Электромагнитная мощность, Вт:

$$P_{эм} = \Omega_1 M_{эм} = (4\pi\, \alpha_f f_{1н} / (2p)) M_{эм}. \tag{7.51}$$

Полезная мощность на валу двигателя

$$P_2 = \Omega_2 M_2 = P_{мех} - (\Delta p_{доб} + \Delta p_{мех\ расч}),$$

где $P_{мех} = \Omega_2 M_{эм}$ — полная механическая мощность,

$\Omega_2 = \Omega_1 (1 - S)$ — угловая скорость вращения ротора,

M_2 — момент на валу двигателя.

Следовательно,

$$\Omega_2 M_2 = \Omega_2 M_{эм} - (\Delta p_{доб} + \Delta p_{мех.расч}).$$

Разделив левую и правую части этого выражения на Ω_2, получим

$$M_2 = M_{эм} - (\Delta p_{доб} + \Delta p_{мех.расч}) / \Omega_2.$$

Угловая скорость вращения ротора, $с^{-1}$

$$\Omega_2 = (4\pi\, \alpha_f\, f_{1н})(1 - S)/(2p). \quad (7.52)$$

Момент холостого хода, Н·м:

$$M_0 = (\Delta p_{доб} + \Delta p_{мех.расч})/\Omega_2. \quad (7.53)$$

Момент на валу двигателя, Н·м:

$$M_2 = M_{эм} - M_0. \quad (7.54)$$

Полезная мощность на валу, Вт:

$$P_2 = \Omega_2 M_2. \quad (7.55)$$

Активная мощность на входе двигателя

$$P_1 = P_2 + \sum \Delta p. \quad (7.56)$$

КПД двигателя

$$\eta = 1 - (\sum \Delta p \,/\, P_1). \quad (7.57)$$

В связи с тем, что при расчете фазного тока статора I_1 по Т-образной электрической схеме замещения не учитывались механические потери и добавочные потери холостого хода и при нагрузке, после расчета активной мощности иа входе двигателя уточняется значение фазного тока статора, А:

$$I_{1расч} = P_1 \,/\, (m_1\, \alpha_U\, U_{1н} \cos \varphi). \quad (7.58)$$

Информационное окно № 7.3
Расчет номинального режима асинхронного двигателя

Расчет рабочих характеристик для шести значений скольжений закончен.

Проверьте выполнение условия подключения блока поиска номинального режима.

Блок поиска номинального режима подключается только при базисных значениях $U_{1н}$ и $f_{1н}$ и при выполнении условия $P_2 > P_{2н}$ при $S = 1{,}2\ S_{н.пред}$.

Необходимая для принятия решения информация:

– номинальная мощность на валу $P_{2н}$=... кВт;

– предварительное значение номинального скольжения $S_{н.пред}$=...;

– скольжение $S = 1{,}2S_{н.пред}$=...;

– мощность на валу при $S = 1{,}2S_{н.пред}$=...; P_2=...кВт.

$P_2 > P_{2н}$ – Да?
(Подключение блока поиска номинального режима,
формулы (7.16)–(7.72), информ. окно № 7.4)

Для нахождения номинального режима организуется цикл с шагом приращения скольжения $T_н = -0{,}02 \cdot S_{н.пред}$, начиная с $S = 1{,}2S_{н.пред} - 0{,}02\ S_{н.пред}$. Поиск номинального режима считается законченным, если выполняется условие $P_2 = P_{2н} \pm \Delta P$, где $\Delta P \leqslant 0{,}005P_{2н}$ – заданная точность вычисления.

$P_2 \leqslant P_{2н}$ – Да?
(Возврат к вводу исходных данных
(информ. окно № 7.1))

При корректировке расчета ($P_2 \leqslant P_{2н}$) необходимо в первую очередь проверить правильность вычисления r_2, r_2', $\Delta p_{ст}$ и $\Delta p_{мех}$, а также соответствие их размерностей при вводе исходных данных.

Расчет номинального режима

При поиске номинального режима используются формулы (7.16)–(7.58).

Поиск номинального режима считается законченным, если выполняется условие $P_2 = P_{2н} \pm \Delta P$, где ΔP – заданная точность вычисления ($\Delta P \leqslant 0{,}005\ P_{2н}$). Для нахождения номинального режима организуется цикл с шагом приращения скольжения $T_н = -0{,}02\ S_{н.пред.}$, начиная с $S = 1{,}2 \cdot S_{н.пред.} - 0{,}02 \cdot S_{н.пред.}$.

Величинам, характеризующим номинальный режим, присваиваются следующие обозначения:

номинальное скольжение

$$S = S_н; \tag{7.59}$$

номинальный фазный ток статора

$$I_1 = I_{1н}; \tag{7.60}$$

номинальный фазный ток ротора, приведенный к статору

$$I'_2 = I'_{2н}; \tag{7.61}$$

номинальная мощность на входе двигателя

$$P_1 = P_{1н}; \tag{7.62}$$

номинальная мощность на валу

$$P_2 = P_{2н\ расч.}; \tag{7.63}$$

номинальный КПД

$$\eta = \eta_н; \tag{7.64}$$

номинальный коэффициент мощности

$$\cos\varphi = \cos\varphi_н; \tag{7.65}$$

номинальный электромагнитный момент

$$M_{эм} = M_{эм.н}; \tag{7.66}$$

номинальная угловая скорость вращения

$$\Omega_2 = \Omega_{2н}; \qquad (7.67)$$

номинальный момент на валу

$$M_2 = M_{2н}. \qquad (7.68)$$

После расчета величин, характеризующих номинальный режим, в программе предусмотрена оценка степени оптимальности выбора геометрических размеров магнитопровода асинхронного двигателя и размерных соотношений его участков:

$$I_{0*} = I_{0расч} / I_{1н}; \qquad (7.69)$$

$$\Delta\,\eta_н\% = \frac{\eta_н - \eta_{н\,пред.}}{\eta_н} \cdot 100; \qquad (7.70)$$

$$\Delta\,\cos\varphi_н\% = \frac{\cos\varphi_н - \cos\varphi_{н.пред.}}{\cos\varphi_н} \cdot 100. \qquad (7.71)$$

После расчета рабочих характерннстик определяются предварительные значения критического скольжения и максимального момента без учета насыщения магнитопровода и вытеснения тока в стержнях обмотки ротора. Сравнивая полученные значения со значениями критического скольжения и максимального момента, вычисленных при расчете пусковых характеристик, можно оценить степень использования зффектов вытеснения тока и насыщения магнитопровода для улучшения пусковых свойств асинхронного двигателя.

Предварительное значение критического скольжения вычисляется по формуле

$$S_{кр.пред} = r_2' / \sqrt{r_1^2 + (\alpha_f x_1 + \alpha_f x_2')^2}. \qquad (7.72)$$

Информационное окно № 7.4
Результаты расчета номинального режима

Сравните полученные данные номинального режима с данными технического задания.

Расчетные данные номинального режима:

$S_н$, о.е.	$I_{1н}$, А	$I'_{2н}$, А	$P_{1н}$, кВт	$P_{2н.расч}$, кВт	$\eta_н$, о.е.	$\cos\varphi_н$, о.е.	$M_{эм\,н}$, Н·м	$\Omega_{2н}$, с$^{-1}$	$M_{2н}$, Н·м

Оценка степени оптимальности выбора геометрических размеров магнитопровода асинхронного двигателя и размерных соотношений его участков.

Ток холостого хода I_{0*} = ...о. е.

В правильно спроектированных двигателях:

$$0,18 \leqslant I_{0*} \leqslant 0,2, \text{ если } 2p = 2;$$

$$0,25 \leqslant I_{0*} \leqslant 0,3, \text{ если } 2p = 4;$$

$$0,35 \leqslant I_{0*} \leqslant 0,4, \text{ если } 2p = 6;$$

$$0,4 \leqslant I_{0*} \leqslant 0,45, \text{ если } 2p = 8.$$

Отклонение КПД $\Delta\eta_н\%$ = ...;

отклонение коэффициента мощности $\Delta\cos\varphi_н\%$ = ...

В правильно спроектированных двигателях

$$\Delta\eta_н\% \geqslant 0;$$

$$\Delta\cos\varphi_н\% \geqslant 0.$$

Предварительное значение критического скольжения

$S_{кр.пред.}$=...

Для большинства асинхронных двигателей $S_{кр.}$≈0,1—0,2. В общем случае диапазон значений критических скольжений лежит в довольно широких пределах — 0,07—0,43.

В небольших двигателях мощностью менее 2—3 кВт ток холостого хода в о. е. может достигать значения 0,5—0,6, несмотря на правильно выбранные размеры и малое насыщеиие магнитопровода. Это объясняется относительно большим значением магнитного напряжения воздушного зазора, характерным для двигателей малой мощности.

Если ток холостого хода получился меньше, чем приведенный в справочных данных, то зто свидетельствует о том, что геометрические размеры двигателя выбраны завышенными и активные материалы недоиспользованы. Такой двигатель может иметь высокие значения КПД и cos φ, но плохие показатели расхода материалов на единицу мощности, большую массу и габариты.

Если же ток холостого хода получился больше, чем приведенный в справочных данных, то это означает: либо габариты двигателя взяты меньше оптимальных, либо неправильно выбраны размерные соотношения участков магнитопровода. Такой двигатель будет иметь низкие КПД и cos φ.

Корректировка расчета: (Да — информ. окно № 7.1. Нет — формулы (7.16)—(7.58) и (7.73)—(7.74), информ. окно № 7.5?).

Вычисленное значение $S_{кр.пред.}$ вводится в программу вместо текущего значения скольжения и производится полный расчет рабочих характеристик прн $S_{кр.пред}$ (7.16)—(7.58).

Вычнсленному значению момента присваивается наименование «предварительное значение максимального момента».

$$\text{Если } S = S_{кр.пред}\text{, то } M_2 = M_{max.пред}. \tag{7.73}$$

После этого рассчитывается предварительное значение перегрузочной способности асинхронного двигателя:

$$K_{м.пред} = M_{max.пред} / M_{2н}. \tag{7.74}$$

На этом расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя заканчивается и на экран монитора выводится информационное окно № 7.5.

Информационное окно № 7.5
Расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя закончен. Проверка введенных данных

Проверьте данные, введенные при расчете:

Число, месяц, год	...
Ваши фамилия, инициалы	...
Группа	...
Руководитель, должность, звание, фамилия, инициалы	...

Данные технического задания на проектирование асинхронного двигателя:

1. Тип двигателя	Аснихронный с короткозамкнутым ротором, обмотка ротора «беличья клетка» (заливка алюминием)
2. Назначение	Общего исполнения или взрывозащищенный
3. Номинальный режим работы	$S1$
4. Номинальная мощность	$P_{2н}$=... кВт
5. Номинальное напряжение	Y/Δ,... В
6. Число полюсов	$2p$ = ...
7. Базисная частота	$f_{1н}$=... Гц
8. Частоты сети, при которых рассчитываются рабочие характеристики двигателя	f_1=... Гц
9. Закон изменения напряжения или ЭДС статора в завнсимости от частоты	$U_1/U_{1н}$=... $E_1/E_{1н}$=...
10. Степень защиты от воздействия окружающей среды	*IP*...
11. Способ охлаждения	*IC*...
12. Исполнение по способу монтажа	*IM*...

13. Климатические условия	....
14. Класс нагревостойкости нзоляции	*F*
15. Маркировка взрывозащиты	......

Проверьте данные, введенные при расчете:

1. Предварительиое значение номинального фазного тока статора	$I_{1н.пред.}$ =... А
2. Предварительное значение номинального КПД	$\eta_{н\ пред}$ =... о.е.
3. Предварительное значение номинального коэффициента мощности	$\cos\varphi_{н\ пред}$ =... о.е.
4. Фиктнвное активное сопротивление, характеризующее магнитные потери	r_{12}=... Ом
5. Сопротивление взаимоиндукции	x_{12}=... Ом
6. Активное сопротивление фазы обмотки статора при расчетной температуре	r_1=... Ом
7. Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора	x_1=... Ом
8. Приведенное к статору активное сопротивление фазы обмотки ротора прн расчетной температуре	r'_2=... Ом
9.Приведенное к статору индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора	x'_2=... Ом
10. Намагничивающий ток	I_μ =... А
11. Обмоточный коэффициеит обмотки статора	$k_{об1}$=...
12. Число витков в фазе статора	W_1=...вит
13. Фазиое иапряжение, при котором ведется расчет рабочих характеристик	U_1=...В
14. Частота напряжения статора, при которой ведется расчет рабочих характеристик	f_1=...Гц
15. Основиые потери в стали при $f_{1н}$	$\Delta p_{ст.осн.}$=...Вт
16. Поверхностные потери статора при $f_{1н}$	$\Delta p_{пов.(1)}$=...Вт
17. Поверхностные потери ротора при $f_{1н}$	$\Delta p_{пов.(2)}$=...Вт
18. Пульсационные потери в зубцах статора при $f_{1н}$	$\Delta p_{пул.(1)}$=...Вт
19. Пульсационные потери в зубцах ротора при $f_{1н}$	$\Delta p_{пул.(2)}$=...Вт
20. Механические потери при $f_{1н}$	$\Delta p_{мех.}$=...Вт

Просмотр введенных данных закончен.

Повторить: (Да — информ. окно № 7.5?).

Результаты расчета: (информ. окно № 7.6?).

Информационное окно № 7.6
Результаты расчета данных, не зависящих от скольжения

r_{12*}=... о. е. (7.1)

(r_{12*}=0,05—0,2)

x_{12*}=... о. е. (7.2)

(x_{12*}=2—5,5)

r_{1*}=... о. е. (7.3)

(r_{1*}=0,01—0,07)

r'_{2*} = ...о. е. (7.4)

(r'_{2*} = 001 - 0,07)

x_{1*}=... о. е. (7.5)

(x_{1*}=0,08—0,14)

x'_{2*} = ...о. е. (7.6)

(x'_{2*} = 0,08 - 0,16)

$r_{1*}x_{12*} - r_{12*}x_{1*}$ = ...о. е. (7.7)

($r_{1*}x_{12*} - r_{12*}x_{1*} > 0$)

$C'_м$=... о. е. (7.8)

α_U=... о. е. (7.9)

α_f=... о. е. (7.10)

$\alpha_{ст}$=... о. е. (7.11)

$\alpha_{пул}$=... о. е. (7.12)

$\alpha_ф$=... о. е. (7.13)

α_r=... о. е. (7.14)

Повторить: (Да — информ. окно № 7.6?).

Результаты расчета, зависящие от скольжения: (Да — информ. окно № 7.7?).

Информационное окно № 7.7
Результаты расчета рабочих характеристик

f_1 = ... Гц U_1 = ... В

Параметры и электрические величины	0,2 $S_{н.пред}$	0,4 $S_{н.пред}$	0,6 $S_{н\ пред}$	0,8 $S_{н\ пред}$	1,0 $S_{н\ пред}$	1,2 $S_{н\ пред}$	$S_{н}$	$S_{кр.пред}$
S								
g_m=…, См (7.16)								
b_m=…, См (7.17)								
g'_{2S}=…, См (7.18)								
b'_{2S}=…, См (7.19)								
g_S=…, См (7.20)								
b_S=…, См (7.21)								
r_S=…,Ом (7.22)								
x_S=…, Ом (7.23)								
r_Σ=…, Ом (7.24)								
x_Σ=…, Ом (7.25)								
$I_{1а}$=…, А (7.26)								
$I_{1р}$=…, А (7.27)								
I_1=…, А (7.28)								
$U_{са}$=…, В (7.29)								
$U_{ср}$=…, В (7.30)								
$U_с$=…, В (7.31)								
$U_н$=…, В (7.32)								
$U_{нб}=E_1$…, В (7.33)								
K_E=…, о.е. (7.34)								
$\Phi_{расч.}$=…, Вб(7.35)								
$I_{оа.расч.}$=…, А (7.36)								
$I_{ор.расч}$ =…, А (7.37)								
$I_{о\ расч.}$=…, А (7.38)								
$I'_{2а}$=…, А (7.39)								
$I'_{2р}$=…, А (7.40)								
I'_2=…, А (7.41)								
$P_{1пред.}$=…, Вт (7.42)								
cos φ=…, о.е. (7.43)								
$M_{эм}$=…, Н·м (7.44)								
$\Delta p_{э1}$=…, Вт (7.45)								
$\Delta p_{э2}$=…, Вт (7.46)								
$\Delta p_{ст.\Sigma}$=…, Вт (7.47)								
$\Delta p_{доб.}$=…, Вт (7.48)								
$\Delta p_{мех\ расч}$=…, Вт (7.49)								
$\sum\Delta p$=…, Вт (7.50)								
$P_{эм}$=…, Вт (7.51)								
Ω_2=…, $с^{-1}$ (7.52)								
$M_о$=…, Н·м (7.53)								
P_2=…, Вт (7.55)								

Параметры и электрические величины	0,2 $S_{н\ пред}$	0,4 $S_{н\ пред}$	0,6 $S_{н\ пред}$	0,8 $S_{н\ пред}$	1,0 $S_{н\ пред}$	1,2 $S_{н\ пред}$	$S_н$	$S_{кр\ пред}$
P_1=..., Вт (7.56)								
η=..., о. е. (7.57)								
$I_{1расч.}$=..., А (7.58)								

Повторить: (Да — информ. окно № 7.7?)

Данные номинального режима: (Да — информ. окно № 7.8?).

Информационное окно № 7.8
Данные номинального режима

Номинальное скольжение

$$S_н = ...; \quad (7.59)$$

номинальный фазный ток статора

$$I_{1н} = ...А; \quad (7.60)$$

номинальный фазный ток ротора, приведенный к статору

$$I'_{2н} = ...\ А; \quad (7.61)$$

номинальная активная мощность на входе двигателя

$$P_{1н} = ...\ кВт; \quad (7.62)$$

номинальная активная мощность на валу

$$P_{2н.} = ...\ кВт; \quad (7.63)$$

номинальный КПД

$$\eta_н = ...\ о.е.; \quad (7.64)$$

номинальиый коэффициент мощности

$$\cos \varphi_{н} = \dots ; \quad (7.65)$$

номинальный электромагнитный момент

$$M_{эм\,н} = \dots \text{ Н·м.} \quad (7.66)$$

номинальная угловая скорость вращения

$$\Omega_{2н} = \dots \text{ с}^{-1}; \quad (7.67)$$

номинальный момент на валу

$$M_{2н} = \dots \text{ Н·м.} \quad (7.68)$$

Данные проверок:

Ток холостого хода $I_{0*} = \dots$ о. е. (7.69)

В правильно спроектированных двигателях:

$$0{,}18 \leqslant I_{0*} \leqslant 0{,}2, \text{ если } 2p = 2;$$

$$0{,}25 \leqslant I_{0*} \leqslant 0{,}3 , \text{ если } 2p = 4;$$

$$0{,}35 \leqslant I_{0*} \leqslant 0{,}4, \text{ если } 2p = 6;$$

$$0{,}4 \leqslant I_{0*} \leqslant 0{,}45, \text{ если } 2p = 8.$$

В двигателях мощностью менее 2—3 кВт ток холостого хода может достигать значения 0,5—0,6 о. е. несмотря на правильно выбранные размерные соотношения магнитопровода.

Отклонение КПД

$$\Delta \eta_{н}\% = \dots\% \quad (7.70)$$

Отклонение коэффициента мощности

$$\Delta \cos\varphi_{н}\% = \dots\%. \quad (7.71)$$

В правильно спроектированных двигателях

$$\Delta \eta_н \% \geq 0, \ \Delta \cos\varphi_н \% \geq 0.$$

Данные о перегрузочной способности:

предварительное значение критического скольжения

$$S_{кр\ пред} = \ldots \text{ о. е.}; \quad (7.72)$$

предварительное значение максимального момента

$$M_{max\ пред.} = \ldots \text{ Н·м}; \quad (7.73)$$

предварительное значение перегрузочной способности

$$K_{м\ пред.} = \ldots \text{ о. е.} \quad (7.74)$$

Анализируя полученную информацию, пользователь должен сделать вывод об оптимальности выбора геометрических размеров магнитопровода асинхронного двигателя и размерных соотношений его участков, а также о правильности выбора параметров обмоток статора и ротора. При правильном выборе вышеперечисленных размеров и параметров относительное значение тока холостого хода должно лежать в заданных пределах, а значение КПД и коэффициента мощности в номинальном режиме должны быть не ниже предварительно выбранных.

Если эти характеристики асинхронного двигателя значительно хуже, чем заданные в техническом задании, то надо в предыдущий расчет асинхронного двигателя внести коррективы и повторно рассчитать рабочие характеристики.

Просмотр результатов расчета рабочих характеристик асинхронного двигателя закончен.

Повторить: (Да – информ. окно № 7.8?).

Печать: (Да – информ. окно № 7.5, № 7.6, № 7.7 и № 7.8?).

8. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НА ЭВМ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ (восьмой фрагмент программы)

Приведена методика расчета на ЭВМ в диалоговом режиме пусковых характеристик трехфазного асинхронного двигателя с обмоткой ротора — литой алюминиевой беличьей клеткой, с грушевидными закрытыми или полузакрытыми пазами при расчетной температуре 115 °С (классы изоляции *F* и *H*). Пусковые характеристики рассчитываются по точной Г-образной схеме замещения асинхронного двигателя с учетом эффектов вытеснения тока и насыщения.

Задача:

а) исследовать влияние эффектов вытеснения тока и насыщения магнитопровода на значения активного сопротивления фазы ротора и индуктивных сопротивлений рассеяния фаз статора и ротора и построить следующие зависимости:

$$K_R = (r'_{2\xi} / r'_2) = f(S);$$

$$K_X = (x'_{2\xi} / x'_2) = f(S);$$

$$k_{нас} = (I_{1нас} / I_1) = f(S);$$

$$x_{1нас*} = (x_{1нас} / x_1) = f(S);$$

$$x'_{2\xi нас*} = x'_{2\xi нас} / x'_2 = f(S);$$

б) рассчитать и построить пусковые характеристики асинхронного двигателя:

$$I_{1п*} = (I_{1нас} / I_{1н}) = f(S);$$

$$M_{п*} = (M_{эм} / M_{эм\,н}) = f(S);$$

в) определить значение критического скольжения $S_{кр}$ и перегрузочную способность асинхронного двигателя:

$$K_м = М_{эм\,max} / М_{эм\,н};$$

г) рассчитать и построить механическую характеристику $n_2 = f(М_{эм})$.

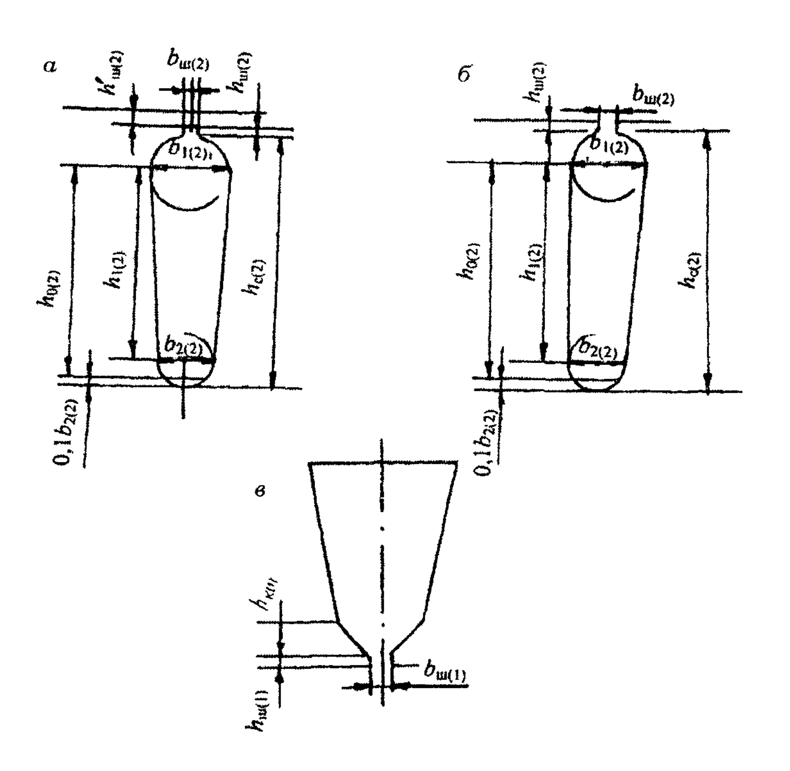


Рис. 8.1. Конфигурации пазов ротора и статора асинхронного двигателя:
а — закрытый грушевидный паз ротора;
б — полузакрытый грушевидный паз ротора;
в — полузакрытый трапецеидальный паз статора

Пусковые характеристики рассчитываются только для базисных значений $U_{1н}$ и $f_{1н}$.

В пояснительной записке к курсовому проекту приводится подробный расчет пусковых характеристик для скольжения $S = 1$. Для остальных значений скольжений данные расчета представляются в табличной форме. Расчет критического скольжения детально объясняется.

Перед составленнем списка исходных данных, необходимых для расчета на ЭВМ, надо начертить пазы статора и ротора асинхронного двигателя в масштабе 5:1 или 2,5:1 и выписать все необходимые для расчета размеры в мм (рис. 8.1 *а*, *б*, *в*).

Закрытый грушевидный паз ротора (см. рис. 8.1, *а*):

$$h_{1(2)}, b_{1(2)}, b_{2(2)}, b_{ш(2)}, h_{ш(2)}, h'_{ш(2)}.$$

Полузакрытый грушевидный паз ротора (см. рис. 8.1, *б*):

$$h_{1(2)}, b_{1(2)}, b_{2(2)}, b_{ш(2)}, h_{ш(2)}, h'_{ш(2)}=0.$$

Полузакрытый трапецеидальный паз статора (см. рис. 8.1, *в*):

$$b_{ш(1)}, h_{ш(1)}, h_{к(1)}.$$

Информационное окно № 8.1
Расчет и оптимизация пусковых характеристик асинхронного двигателя. Ввод исходных данных

Число, месяц, год	...?
Ваши фамилия, инициалы	...?
Группа	...?
Руководитель, должиость, звание, фамилия, инициалы	...?

Введите данные технического задания на проектирование асинхронного двигателя:

1. Тип двигателя	Асинхронный с короткозамкнутым ротором, обмотка ротора «беличья клетка» (заливка алюминием)
2. Назначение	Общего исполнения или взрывозащищенный
3. Номинальный режим работы	$S1$
4. Номинальная мощность	$P_{2н}$=... кВт
5. Номинальиое напряжение	Y/Δ,... В
6. Число полюсов	$2p$ = ...
7. Базисная частота	$f_{1н}$=... Гц
8. Частоты сети, при которых рассчитываются рабочие характеристики двигателя	f_1=... Гц
9. Закон изменения иапряжения или ЭДС статора в зависимости от частоты	$U_1/U_{1н}$=... $E_1/E_{1н}$=...
10. Степень защиты от воздействия окружающей среды	*IP*...
11. Способ охлаждеиия	*IC*...
12. Исполненне по способу монтажа	*IM*...
13. Климатические условия	....
14. Класс нагревостойкости изоляции	*F*
15. Маркировка взрывозащиты	......

Введите данные, необходимые для расчета:

Данные асинхронного двигателя:			
1.	Номинальный фазный ток статора	$I_{1н}$=...? А	
2.	Приведенный к статору номинальный фазный ток ротора	$I'_{2н}$ = ...? А	
3.	Номинальное скольжение	$S_н$=...? о. е.	
4.	Предварительное значение перегрузочной способности двигателя	$K_{м.пред.}$=...? о. е.	
5.	Высота оси вращения двигателя	h =...? мм	

Геометрические размеры паза ротора (см. рис. 8.1, *а*, *б*):			
6.		$h_{1(2)}=\ldots$? мм	Для полузакрытого паза ротора ввести $h'_{ш(2)} = 0$
7.		$b_{1(2)}=\ldots$? мм	
8.		$b_{2(2)}=\ldots$? мм	
9.		$b_{ш(2)}=\ldots$? мм	
10.		$h_{ш(2)}=\ldots$? мм	
11.		$h'_{ш(2)}=\ldots$? мм	
Геометрические размеры паза статора (см. рис. 8.1, *в*):			
12.		$b_{ш(1)}=\ldots$? мм	
13.		$h_{ш(1)}=\ldots$? мм	
14.		$h_{к(1)}=\ldots$? мм	
Параметры Т-образной электрической схемы замещения:			
15.	Фиктивное активное сопротивление, характеризующее магнитные потери	$r_{12}=\ldots$? Ом	
16.	Сопротивление взаимоиндукции	$x_{12}=\ldots$? Ом	
17.	Активное сопротивление фазы статора при расчетной температуре	$r_1=\ldots$? Ом	
18.	Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора	$x_1=\ldots$? Ом	
19.	Приведенное к статору актнвное сопротивление фазы ротора	$r'_2=\ldots$? Ом	
20.	Приведенное к статору ннduктивное сопротивление рассеяиия фазы ротора	$x'_2=\ldots$? Ом	
Данные беличьей клетки ротора:			
21.	Активное сопротивление стержня ротора	$r_c=\ldots 10^6$? Ом	В связи с тем, что в формуле определяется отношение r_c / r_2 можно оба параметра умножить на 10^6
22.	Активное сопротивление фазы ротора	$r_2=\ldots 10^6$? Ом	
23.	Число пазов ротора	$z_2=\ldots$? паз	
24.	Зубцовое деление ротора	$t_2=\ldots$? мм	

Данные обмотки статора:			
25.	Число параллельных ветвей в фазе	a=...?	
26.	Число пазов статора	z_1=...? паз	
27.	Число витков в фазе обмоткн статора	W_1=...? вит	
28.	Число эффективных проводников в пазу статора	$u_п$=...?	
29.	Полюсное деление	τ =...? паз	Для однослойных обмоток принимают $y=\tau$, так как для них $\beta_1 = 1$. Для двухслойной обмотки $k_{об1}=k_{у1} \cdot k_{р1}$. Для однослойной обмотки $k_{об1}=k_{р1}$.
30.	Шаг обмотки	y =...? паз	
31.	Зубцовое деление статора	t_1=...? мм	
32.	Коэффициент укорочения шага обмотки статора	$k_{у1}$=...?	
33.	Обмоточный коэффицнент обмотки статора	$k_{об1}$=...?	
Данные магнитной системы асинхронного двигателя:			
34.	Воздушный зазор	δ =...? мм	
35.	Коэффициент насыщения магнитной цепи в номинальном режиме	k_μ=...?	
36.	Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния статора	$\lambda_{п1}$=...?	
37.	Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния статора	$\lambda_{д1}$=...?	
38.	Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния статора	$\lambda_{л1}$=...?	
39.	Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора	$\lambda_{п2}$=...?	
40.	Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора	$\lambda_{д2}$=...?	
41.	Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния ротора	$\lambda_{л2}$=...?	

Корректировка расчета: (Да — информ. окно № 8.1. Нет — формулы (8.1)—(8.30), информ. окно № 8.2?).

Комментарий. На составление списка исходных данных и запись их в ЭВМ необходимо обращать особое внимание, так как от правиль-

ности внесения этого списка в ЭВМ в основном зависит успешность решения задачи.

Метод расчета на ЭВМ заключается в следующем. Расчет пусковых характеристик начинают со скольжения $S = 1$. При $S > S_{кр\ пред}$ шаг расчета принимается $T = -0,2$, т. е. значение скольжения определяется по формуле $S = S - T$. При значении скольжения $S < S_{кр.пред.}$ скольжение приравнивается к предварительному критическому ($S = S_{кр\ пред}$), и рассчитываются величины сопротивлений при учете эффектов вытеснения тока и насыщения:

$$r'_{2\xi},\ x_{1нас},\ x'_{2\xi\ нас}\ \text{при}\ S = S_{кр.пред}.$$

Используя вычисленные значения сопротивлений, определяют величину критического скольжения $S_{кр}$ и все параметры пусковых характеристик, соответствующие критическому скольжению. После этого рассчитываются еще две точки пусковых характеристик при скольжении $0,6\ S_{кр}$ и $0,4\ S_{кр}$.

При проведении расчета на ЭВМ пользователь может получить два типа сообщений, выводимых на экран монитора. В первом случае ЭВМ сообщает, что значение переменной лежит вне допустимых физических пределов, а во втором — о степени отклонения физической переменной от оптимального значения. В обоих случаях пользователь должен самостоятельно принять решение, продолжать расчет при полученном значении физической переменной или провести корректировку расчета.

Блок расчета величин, не зависящих от значения скольжения

С целью минимизации вычислительных процедур на первом этапе рассчитываются все величиины, не зависящие от значения скольжения.

Геометрические размеры паза ротора, мм:

$$h_{c(2)} = h_{1(2)} + 0{,}5b_{1(2)} + 0{,}5b_{2(2)}\ ; \qquad (8.1)$$

$$h_{0(2)} = h_{1(2)} + 0{,}4b_{2(2)}\ . \qquad (8.2)$$

Площадь поперечного сечения стержня ротора (закрытый или полузакрытый грушевидный паз), мм^2:

$$q_{c(2)} = \frac{\pi\,(b_{1(2)}^2 + b_{2(2)}^2)}{8} + 0{,}5h_{1(2)}(b_{1(2)} + b_{2(2)})\ . \qquad (8.3)$$

Минимальная и максимальная условные глубины проникновения тока в стержень обмотки ротора, мм:

$$h_{r(1)} = 0{,}5\ b_{1(2)}; \qquad (8.4)$$

$$h_{r(2)} = h_{1(2)} + 0{,}5\ b_{1(2)}. \qquad (8.5)$$

Коэффициент приведения тока для короткозамкнутой обмотки ротора

$$\nu_i = \frac{6W_1k_{об1}}{Z_2}\ . \qquad (8.6)$$

Номинальный фазный ток ротора, А:

$$I_{2н} = \nu_i \cdot I'_{2н}\,. \qquad (8.7)$$

Постоянная составляющая коэффициента магнитной проводимости пазового рассеяния ротора (коэффициент магнитной проводимости участка паза, занятого проводником)

$$\lambda'_{п2} = \frac{h_{0(2)}}{3b_{1(2)}}\left(1 - \frac{\pi \cdot b_{1(2)}^2}{8q_{c(2)}}\right)^2 + 0{,}66 - \frac{b_{ш(2)}}{2b_{1(2)}}\,. \qquad (8.8)$$

Относительный шаг обмотки статора

$$\beta_1 = \frac{y}{\tau}. \qquad (8.9)$$

Достоверные значения β_1:

Однослойная обмотка: $\beta_1 = 1$;

Двухслойная обмотка:

$$\beta_1 = 0{,}58–0{,}63 \text{ при } 2p = 2;$$

$$\beta_1 = 0{,}78–0{,}83 \text{ при } 2p > 2.$$

Значение коэффициента k'_β вычисляется по одному из следующих соотношений:

$$k'_\beta = 1, \text{ если } \beta_1 = 1; \qquad (8.10)$$

$$k'_\beta = 0{,}25(1 + 3\beta_1), \text{ если } 0{,}66 \leq \beta_1 < 1; \qquad (8.11)$$

$$k'_\beta = 0{,}25(6\beta_1 - 1), \text{ если } 0{,}33 \leq \beta_1 < 0{,}66. \qquad (8.12)$$

Коэффициент размерных соотношений зубцовых зон статора и ротора

$$C_N = 0{,}64 + 2{,}5\sqrt{\frac{\delta}{(t_1 + t_2)}}. \qquad (8.13)$$

Коэффициенты и параметры точной Г-образной схемы замещения асинхронного двигателя без учета эффектов вытеснения тока и насыщения и не зависящие от значения скольжения

Расчет комплексного коэффициента эквивалентности Т- и Г-образных схем замещения $\underline{C}_1$

В начале расчета определяются все составляющие комплексного коэффициента эквивалентности Т- и Г-образных схем замещения $\underline{C}_1$

$$\underline{C}_1 = 1 + \frac{\underline{z}_1}{\underline{z}_{12}} = 1 + \frac{r_1 + jx_1}{r_{12} + jx_{12}} = C_{1a} - jC_{1p} = C_1 e^{-j\gamma}.$$

Для асинхронных двигателей мощностью более 2—3 кВт характерно неравенство:

$$r_{1*} \cdot x_{12*} - r_{12*} \cdot x_{1*} > 0,$$

поэтому перед мнимой частью комплексного коэффициента $\underline{C}_1$ стоит знак минус.

В программе предусмотрен расчет следующих компонентов комплексного числа $\underline{C}_1$:

активной составляющей

$$C_{1a} = \frac{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})}{r_{12}^2 + x_{12}^2}; \tag{8.14}$$

реактивной составляющей

$$C_{1p} = (r_1 x_{12} - r_{12} x_1)/(r_{12}^2 + x_{12}^2); \tag{8.15}$$

модуля комплексного коэффициента

$$C_1 = \sqrt{C_{1a}^2 + C_{1p}^2}. \tag{8.16}$$

В асинхронных двигателях мощностью более 2—3 кВт модуль комплексного коэффициента обычно меньше 1,1. В двигателях мощностью менее 2—3 кВт это соотношение может не выполняться.

Расчет компонентов комплексного полного сопротивления контура намагничивания

На первом этапе расчета Г-образной схемы замещения (рис. 8.2 и 8.3) определяются компоненты полного сопротивления контура намагничивания:

$$\underline{Z}_m = \underline{C}_1 \underline{z}_{12} = (C_{1a} - jC_{1p})(r_{12} + jx_{12}) = R_m + jX_m = Z_m e^{j\varphi_0}.$$

В программе предусмотрен расчет следующих величин:

$$R_m = C_{1a} r_{12} + C_{1p} x_{12}; \tag{8.17}$$

$$X_m = C_{1a} x_{12} - C_{1p} r_{12}; \tag{8.18}$$

$$Z_m = \sqrt{R_m^2 + X_m^2}; \tag{8.19}$$

$$\cos\varphi_0 = R_m / Z_m; \tag{8.20}$$

$$\sin\varphi_0 = X_m / Z_m. \tag{8.21}$$

Далее вычисляется ток холостого хода I_0, его активная I_{0a} и реактивная I_{0p} составляющие (см. рис. 8.3):

$$I_0 = U_{1н} / Z_m; \tag{8.22}$$

$$I_{0a} = I_0 \cos\varphi_0; \tag{8.23}$$

$$I_{0p} = I_0 \sin\varphi_0. \tag{8.24}$$

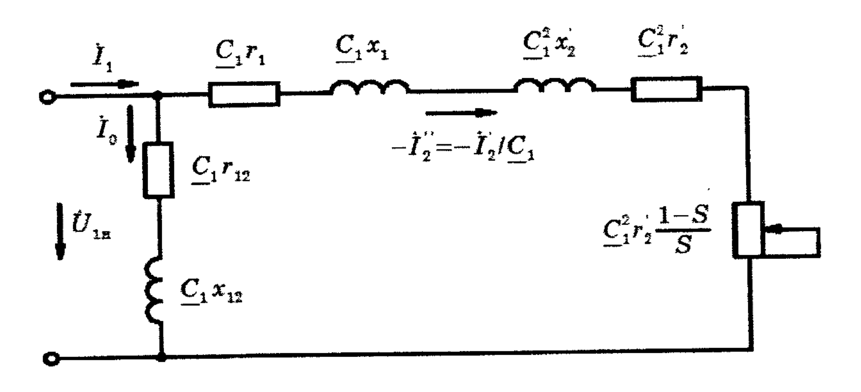


Рис. 8.2. Точная Г-образная электрическая схема замещения асинхронного двигателя без учета эффектов вытеснения тока и насыщения

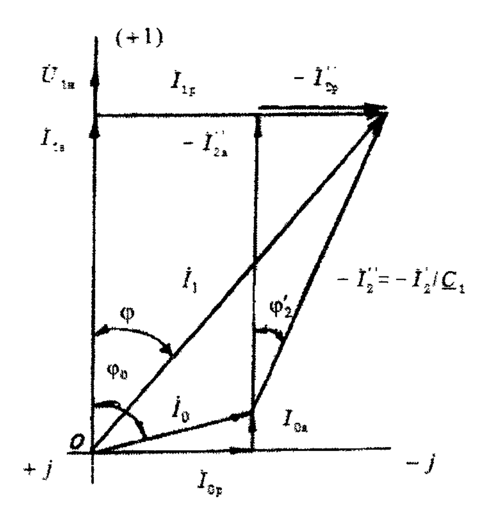


Рис. 8.3. Векторная диаграмма, соответствующая Г-образной схеме замещения асинхронного двигателя

Расчет постоянных коэффициентов основного контура Г-образной схемы замещения

Вычисление полного сопротивления основного контура точной Г-образной схемы замещения (см. рис. 8.2) производится в программе с учетом его комплексного характера

$$\underline{Z}_s = \underline{C}_1\underline{z}_1 + \underline{C}_1^2\underline{z}'_{2s} = (C_{1a} - jC_{1p})(r_1 + jx_1) + (C_{1a} - jC_{1p})^2\left(\frac{r'_2}{S} + jx'_2\right) =$$

$$= R_s + jX_s = Z_s e^{j\varphi'_2},$$

где

$$R_s = C_{1a}r_1 + C_{1p}x_1 + 2C_{1a}C_{1p}x'_2 + (C_{1a}^2 - C_{1p}^2)\frac{r'_2}{S};$$

$$X_s = C_{1a}x_1 - C_{1p}r_1 + (C_{1a}^2 - C_{1p}^2)x'_2 - 2C_{1a}C_{1p}\frac{r'_2}{S};$$

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2};$$

$$\varphi_2^{'} = \operatorname{arctg}(X_S / R_S) = \arccos(R_S / Z_S).$$

Расчет этого блока программы начинается с определения постоянных коэффициентов:

$$a' = C_{1a}^2 - C_{1p}^2; \qquad (8.25)$$

$$b' = 2\, C_{1a}\, C_{1p}; \qquad (8.26)$$

Предварительное значение критического скольжения

$$S_{\text{кр.пред}} = \frac{(C_1 \cdot r_2')}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + C_1 \cdot x_2')^2}} . \qquad (8.27)$$

Учитывая, что сопротивление взаимоиндукции x_{12} с уменьшением насыщения магнитопровода увеличивается, в расчете пусковых характеристик для скольжений $S \geqslant (0{,}1\text{—}0{,}15)$ оно принимается:

$$x_{12\text{п}} = k_{\mu} \cdot x_{12} . \qquad (8.28)$$

Скорость вращения магнитного поля в пространстве, об/мин:

$$n_1 = \frac{60 f_{1\text{н}}}{p} = \frac{120 f_{1\text{н}}}{2p}. \qquad (8.29)$$

Номинальный электромагнитный момент, Н·м:

$$M_{\text{эм.н}} = \frac{m_1 p}{2\pi f_{1\text{н}}} \cdot (I_{2\text{н}}^{'})^2 \cdot \frac{r_2^{'}}{S_{\text{н}}} = \frac{m_1 2p}{4\pi f_{1\text{н}}} \cdot (I_{2\text{н}}^{'})^2 \cdot \frac{r_2^{'}}{S_{\text{н}}} . \qquad (8.30)$$

Информационное окно № 8.2
Рассчитанные значения величин, не зависящих от скольжения

$h_{c(2)}$=... мм (8.1)

$h_{0(2)}$=... мм (8.2)

$q_{c(2)}$=... мм (8.3)

$h_{r(1)}$=... мм (8.4)

$h_{r(2)}$=... мм (8.5)

ν_1=... (8.6)

$I_{2н}$=...А (8.7)

$\lambda'_{п2}$ = ... (8.8)

β_1=... (8.9)

(Однослойная обмотка β_1=1;

двухслойная обмотка:

β_1=0,58—0,63 при 2р=2,

β_1=0,78—0,83 при 2р>2.)

k'_β = ... (β_1=1) (8.10)

k'_β = ... (0,66≤β_1<1) (8.11)

k'_β = ... (0,33≤β_1<0,66) (8.12)

C_N=... (8.13)

$C_{1а}$=... (8.14)

$C_{1р}$=... (8.15)

C_1 =... (8.16)

R_m=... Ом (8.17)

X_m=... Ом (8.18)

Z_m=... Ом (8.19)

cos φ_0=... (8.20)

sin φ_0=... (8.21)

I_0= ... А (8.22)

$I_{0а}$=...А (8.23)

$I_{0р}$=...А (8.24)

a' = ... (8.25)

b' = ... (8.26)

$S_{кр.пред}$=... (8.27)

$x_{12п}$=...Ом (8.28)

n_1=...об/мин (8.29)

$M_{эм\,н}$=...Н·м (8.30)

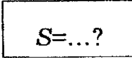
Геометрические размеры паза ротора $h_{C(2)}$, $h_{0(2)}$, $q_{c(2)}$ должны совпадать с ранее полученными результатами расчета (см. третий фрагмент программы).

Номинальный электромагнитный момент обычно превышает значение номинального момента на валу на 2—6 %.

Корректировка расчета: (Да — информ. окно № 8.1. Нет — информ. окно № 8.3?).

Информационное окно № 8.3
Ввод значения скольжения

Введите значение скольжения



Необходимая для принятия решения информация:

— расчет необходимо начинать с ввода значения скольжения S=1;

— последующие вводимые значения скольжений: 0,8; 0,6; 0,4; 0,2; $S_{кр.пред.}$; $S_{кр}$; 0,6 $S_{кр}$; 0,4 $S_{кр}$.

При скольжении S = 1 определяют начальный пусковой ток статора и начальный пусковой момент двигателя.

При критическом скольженин определяют максимальный момент и перегрузочную способность двигателя.

Корректировка расчета: (Да — информ. окно № 8.3. Нет — формула (8.31), информ. окно № 8.4?).

Блок расчета пусковых характеристик с учетом эффекта вытеснения тока

Известно, что с увеличением частоты тока в стержнях обмотки короткозамкнутого ротора возникает эффект вытеснения тока, в результате которого плотность тока в верхней части стержней возрастает, а в нижней уменьшается, при этом активное сопротивление ротора увеличнвается, а индуктивное уменьшается. Изменение сопротивлений ротора влияет на пусковые характеристики машины.

В большинстве случаев эффект вытеснения тока в обмотках короткозамкнутых роторов играет положительную роль, так как увеличивает пусковые моменты двигателей. Это широко используют при проектировании асинхронных машин, выполняя роторы с глубокими прямоугольными или фигурными пазами или с двойной беличьей клеткой, в которых эффект вытеснения тока проявляется особенно сильно. Однако неравномерное распределение плотности тока по сечению стержня ротора может привести и к нежелательным явлениям. Например, при неудачно выбранных размерных соотношениях стержней чрезмерно возрастающая в пусковых режимах плотность тока в их верхних участках может вызвать неравномерное тепловое удлинение стержней и их изгиб. При этом стержни разрывают усики пазов и выгибаются в воздушный зазор, что неизбежно приводит к выходу двигателя из строя. В связи с этим правильный учет влияния эффекта вытеснения тока является необходимым при проектировании асинхронных машин с короткозамкнутыми роторами.

В расчетах оказалось удобнее определять не непосредственно активное и индуктивное сопротивления стержней при неравномерной плотности тока, а их относительные изменения под действием эффекта вытеснения тока. Эти изменения оценивают коэффициентами k_r и $k_д$. Коэффициент k_r показывает, во сколько раз увеличилось активное сопротивление пазовой части стержня $r_{с\xi}$ при неравномерной плотности тока в нем по сравнению с его сопротивлением $r_с$ при одинаковой плотности по всему сечению стержня:

$$k_r = \frac{r_{с\xi}}{r_с}.$$

Коэффициент демпфирования $k_д$ показывает, как уменьшилась магнитная проводимость $\lambda'_{п\xi}$ участка паза, занятого проводником с током, при действии эффекта вытеснения тока по сравнению с проводимостью того же участка, но при равномерной плотности тока в стержне $\lambda'_п$:

$$k_{д} = \frac{\lambda'_{п\xi}}{\lambda'_{п}}.$$

Расчет начинается с вычнсления приведенной высоты стрежня ротора, которая является безразмерной величиной.

Приведенная высота стержня ротора рассчитывается по формуле:

$$\xi = 2\pi h_{c} \sqrt{\frac{b_{c}}{b_{п}} \frac{f_{2}}{\rho_{cv}}} \cdot 10^{-7},$$

где h_c — высота стержня, м;

b_c — ширина стержня,

$b_п$ — ширина паза,

ρ_{cv} — удельное сопротнвление материала стержня при расчетной температуре, Ом·м.

При вставных стержнях ротора b_c=0,9 $b_п$, в роторах с литой обмоткой $b_c = b_п$.

Для роторов с литой алюминиевой обмоткой при расчетной температуре 115 °C (ρ_{cv} = 10^{-6} / 20,5 Ом·м) вышеприведеиная формула преобразуется к следующему виду:

$$\xi = 8{,}996\, h_{c} \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{S f_{1н}}, \tag{8.31}$$

где h_c — высота стержня, мм;

$f_2 = Sf_{1н}$ — частота тока в роторе в расчетном режиме, Гц.

Информационное окно № 8.4
Коррекция приведенной высоты стержня ротора

Рассчитанное значение прнведенной высоты стержня ротора ξ=...

Информация, необходимая для принятия решения:

— скольжение S=...;

— предварительное значение перегрузочной способности двигателя $K_{м.пред.}$=... .

Если пользователь стремится в полной мере использовать эффект вытеснения тока для улучшения пусковых свойств аснихронного двигателя, то при $S = 1$ приведенная высота стержня ротора должна быть больше двух ($\xi > 2$). Для увеличения проведенной высоты стержня ротора надо сконструировать паз ротора с возможно большим значением $h_{c(2)}$.

Если полученное значенне приведенной высоты паза ротора прн $S = 1$ меньше двух ($\xi < 2$), но предварительное значение перегрузочной способности двигателя $K_{м.пред.}>1,6$, то расчет можно продолжать без коррекции геометрических размеров паза ротора.

При скольжениях меньше единицы ($S<1$) коррекцию приведенной высоты стержня ротора не проводят.

Корректировка расчета: (Да — третий фрагмент программы. Нет — нинформ. окно № 8.5?).

Информационное окно № 8.5
Определение нелинейной функции φ

Информация, необходимая для принятия решения:
скольжение S=...;
приведенная высота стержня ротора ξ =...

$1 \leqslant \xi \leqslant 4$ — Да?

Нелинейную функцию φ определнть по рис. 8.4 и ввестн в ЭВМ

φ =...?

$\xi < 1$ — Да?

Формула (8.32)

$\xi > 4$ — Да?

Формула (8.33)

Корректировка расчета: (Да — информ. окно № 8.5. Нет — формулы (8.32)–(8.34), информ. окно 8.6?).

Нелинейная функция φ:

$$\text{если } \xi < 1, \text{ то } \varphi = 0{,}089\,\xi^{4}; \tag{8.32}$$

$$\text{еслн } \xi > 4, \text{ то } \varphi = \xi - 1. \tag{8.33}$$

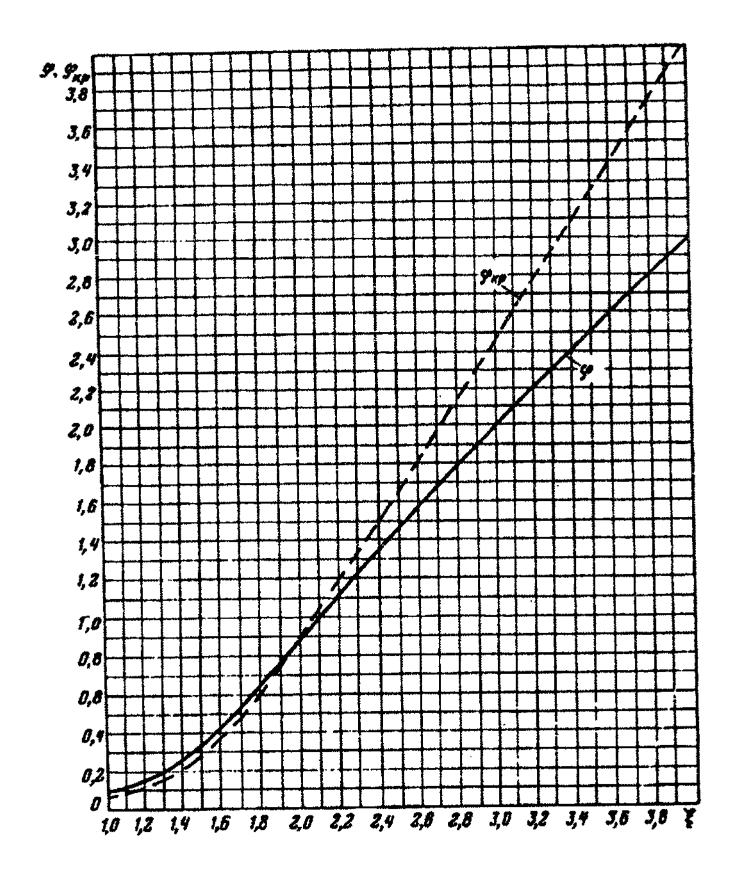


Рис. 8.4. Зависимости φ и $\varphi_{кр}$ в функции приведенной высоты стержня ξ

Глубина проннкновения тока в стержень, мм

$$h_r = \frac{h_{c(2)}}{(1+\varphi)}. \tag{8.34}$$

Информационное окно № 8.6
Расчет площади проникновения тока в стержень обмотки ротора

Информация, необходимая для принятия решения:

— глубнна проникновения тока в стержень h_r=...мм;

— минимальная глубина проникновения тока в стержень $h_{r(1)}$=... мм;

— максимальная глубина проникновения тока в стержень $h_{r(2)}$=... мм.

$h_{r(1)} \leqslant h_r \leqslant h_{r(2)}$ — Да?

Формулы (8.35), (8.36)

$h_r > h_{r(2)}$ — Да?

Формула (8.37)

$h_r < h_{r(1)}$ — Да?

Информ. окно № 8.7.

Корректировка расчета: (Да — информ. окно № 8.6. Нет — формулы (8.35)—(8.37), информ. окно № 8.8?).

Площадь проникновения тока в стержень обмотки ротора.

Если $h_{r(1)} \leqslant h_r \leqslant h_{r(2)}$, то

$$b_r = b_{1(2)} - \frac{b_{1(2)} - b_{2(2)}}{h_{1(2)}}\left(h_r - \frac{b_{1(2)}}{2}\right); \tag{8.35}$$

$$q_r = \frac{\pi b^2_{1(2)}}{8} + \frac{b_{1(2)} + b_r}{2}\left(h_r - \frac{b_{1(2)}}{2}\right). \quad (8.36)$$

$$\text{Если } h_r > h_{r(2)},\ q_r = q_{c(2)}. \quad (8.37)$$

Информационное окно № 8.7

Определение нелинейной функции $\varphi_{кр}$

Информация, необходимая для прннятия решения:

— глубина проникновения тока в стержень h_r=... мм;

— мнинимальная глубина проникновения тока в стержень $h_{r(1)}$=... мм;

— расчет нелинейной функции $\varphi_{кр}$ пронзводится только в том случае, еслн выполняется неравенство $h_r < h_{r(1)}$;

— приведенная высота стержня ротора ξ =...

$1 \leqslant \xi \leqslant 4$ — Да?

Нелинейную функцию $\varphi_{кр}$ определить по рис. 8.4 и ввести в ЭВМ

$\varphi_{кр}$ =...?

$\xi < 1$— Да?

Формула (8.38)

$\xi > 4$ — Да?

Формула (8.39)

Корректировка расчета: (Да — информ. окно № 8.7. Нет — формулы (8.38)—(8.40), информ. окно № 8.8?).

Нелинейная функция $\varphi_{кр}$:

$$\text{— если } \xi < 1, \text{ то } \varphi_{кр} = 0{,}089\ \xi^4; \quad (8.38)$$

$$\text{— если } \xi > 4, \text{ то } \varphi_{кр} = \xi. \quad (8.39)$$

Площадь проникновения тока в стержень, мм[2]:

$$q_r = \frac{\pi b_{1(2)}^2}{4(\varphi_{кр} + 1)}. \qquad (8.40)$$

Информационное окно № 8.8
Данные расчета площади проникновения тока в стержень обмотки ротора при учете эффекта вытеснения тока

Минимальная глубина проникновения тока в стержень $h_{r(1)}$=... мм (8.4)

Максимальная глубина проникновення тока в стержень $h_{r(2)}$=... мм (8.5)

Данные прн скольжении S =...:

Приведенная высота стержня ротора ξ =... (8.31)

Нелинейная функция φ=... (рис. 8.4) ($1 \leqslant \xi \leqslant 4$)

Нелинейная функция φ=... ($\xi < 1$) (8.32)

Нелинейная функция φ=... ($\xi > 4$) (8.33)

Глубина проникновения тока в стержень h_r=... мм (8.34)

Условная ширина стержня ротора b_r=... мм ($h_{r(1)} \leqslant h_r \leqslant h_{r(2)}$) (8.35)

Площадь проникновения тока в стержень ротора q_r=... мм[2] (8.36) ($h_{r(1)} \leqslant h_r \leqslant h_{r(2)}$).

Площадь проннкновения тока в стержень ротора q_r=... мм[2] (8.37) ($h_r \geqslant h_{r(2)}$).

Нелинейная функция $\varphi_{кр}$ определяется только при условни $h_r < h_{r(1)}$.

Нелинейная функция $\varphi_{кр}$=... (рнс. 8.4) ($1 \leqslant \xi \leqslant 4$).

Нелинейная функция $\varphi_{кр}$=... ($\xi < 1$). (8.38)

Нелинейная функция $\varphi_{кр}$=... ($\xi > 4$). (8.39)

Площадь проникновения тока в стержень ротора q_r=... мм[2] (8.40) ($h_r < h_{r(1)}$).

Корректировка расчета: (Да — информ. окно № 8.1. Нет — формулы (8.41)–(8.44), информ. окно № 8.9?).

На этом этапе разветвление программы заканчивается и определяется коэффициент k_r, учитывающий увеличенне активного сопротивления пазовой части стержня ротора прн действин эффекта вытеснения тока:

$$k_r = q_{c(2)} / q_r. \quad (8.41)$$

$$\text{Если } k_r < 1, \text{ то прнннмается } k_r = 1. \quad (8.42)$$

Выраженне (8.42) введено в программу, так как по физической сути коэффициент k_r не может принимать значения меньше единицы ($k_r \geqslant 1$).

Коэффициент K_R, учитывающий увеличение актнвного сопротивления фазы ротора, вычисляется по выражению

$$K_R = 1 + r_c(k_r - 1)/r_2, \quad (8.43)$$

а приведенное к статору значение активного сопротивления фазы ротора — по формуле, Ом

$$r'_{2\xi} = K_R \cdot r'_2. \quad (8.44)$$

Информационное окно № 8.9
Расчет коэффициента демпфирования $k_д$=φ′

Результаты расчета активного сопротивления фазы ротора с учетом эффекта вытеснения тока:

Данные при скольжении

$$S = \ldots$$

$$k_r = \ldots \ (8.41) \ (k_r \geqslant 1);$$

$$k_r = \ldots \ (8.42) \ (\text{если } k_r < 1);$$

$$K_R = \ldots (8.43) \ (K_R \geqslant 1);$$

$$r'_{2\xi} = \ldots \text{Ом (8.44)} \; (r'_{2\xi} \geq r'_2).$$

Коэффициент демпфирования $k_д$, показывающий, во сколько раз уменьшилась магнитная проводимость участка паза ротора при дейстзни эффекта вытеснения тока, приравннвается к нелинейной функции φ′.

Информация, необходнмая для принятия решения:

— приведенная высота стержня ротора ξ=… .

$0 \leqslant \xi \leqslant 4$ — Да?

Нелинейную функцию φ′ определить по рис. 8.5 и ввести в ЭВМ

φ′ =…?

ξ > 4 — Да?

Формула (8.45)

Корректировка расчета: (Да — информ. окно № 8.9. Нет — формула (8.45), информ. окно № 8.10?).

Коэффицнент демпфирования $k_д$=φ′.

$$\text{если } \xi > 4, \text{ то } \varphi' = 3/(2\,\xi). \qquad (8.45)$$

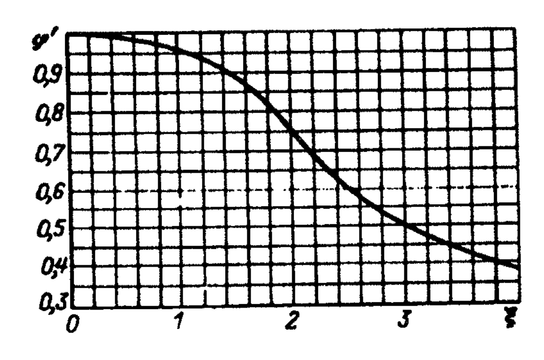


Рис. 8.5. Зависимость φ′ в функции приведенной высоты стержня ξ

Информационное окно № 8.10
Прогноз кратности начального пускового тока

Введите прогнозируемую кратность начального пускового тока для рассчитываемого двигателя (табл. 8.1).

Информация, необходимая для принятия решения:

высота оси вращения $h = \dots$ мм,

число полюсов $2p = \dots$;

степень защиты IP...

$$I_{п.пред*} = \dots ?$$

Таблица 8.1

Кратность начальных пусковых токов асинхронных двигателей

Исполнение	h, мм	≤ 132	160—250	≥ 280
	2p	$I_{п\ пред*}$	$I_{п\ пред*}$	$I_{п\ пред*}$
IP 44	2	6,5—7,5	7,0—7,5	6,5—7,0
IP 54	4	5,0—7,5	6.5—7,5	5,5—7,0
	6	4,0—6,5	5,0—6,5	5,5—6,5
	8	4,0—5,5	5,5—6,0	5,5—6,5
	10	—	6,0	6,0
	12	—	—	6,0
IP 23	2	—	7,0	6,5—7,0
	4	—	6,5	6,0—7,0
	6	—	6,0—7,0	6,0
	8	—	5,5—6,0	5,0—5,5
	10	—	—	5,5
	12	—	—	5,5

Примечание. Некоторые двигатели малой мощности с высотой оси вращения $h \leqslant 80$ мм выполняются с уменьшенной кратностью начального пускового тока при $2p = 2$ до $I_{п.пред*} = 4{,}0$; при $2p = 4$ — до $I_{п.пред*} = 2{,}5$; и при $2p > 4$ — до $I_{п\ пред*} = 3{,}0$.

Корректировка расчета: (Да — информ. окно № 8.10. Нет — формулы (8.46)—(8.64), информ. окно № 8.11?).

Прогнозируемое значение тока ротора в пусковом режиме, А:

$$I_2 = I_{\text{п пред.*}} \cdot I_{2\text{н}} \cdot e^{-0,05/S} . \tag{8.46}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния короткозамкнутого ротора с учетом действия эффекта вытеснения тока

$$\lambda_{\text{п}2\xi} = \lambda'_{\text{п}2}\varphi' + \frac{h_{\text{ш}(2)}}{b_{\text{ш}(2)}} + 1{,}12 \cdot 10^3 \frac{h'_{\text{ш}(2)}}{I_2} , \tag{8.47}$$

где $\lambda'_{\text{п}2}$ — см. формулу (8.8), $h'_{\text{ш}(2)} = 0$ — если паз ротора полузакрытый.

Изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока

$$K_\text{x} = \frac{\lambda_{\text{п}2\xi} + \lambda_{\text{л}2} + \lambda_{\text{д}2}}{\lambda_{\text{п}2} + \lambda_{\text{л}2} + \lambda_{\text{д}2}} . \tag{8.48}$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом действия эффекта вытеснения тока, Ом:

$$x'_{2\xi} = K_\text{x} x'_2 . \tag{8.49}$$

Расчет фазного тока статора по точной Г-образной схеме замещения асинхронного двигателя при учете эффекта вытеснения тока (рис. 8.6).

$$a_\xi = C_{1\text{a}} r_1 + C_{1\text{p}} x_1 + b' x'_{2\xi} ; \tag{8.50}$$

$$b_\xi = C_{1\text{a}} x_1 - C_{1\text{p}} r_1 + a' x'_{2\xi} ; \tag{8.51}$$

$$R_{S\xi} = a_\xi + \frac{a' r'_{2\xi}}{S} ; \tag{8.52}$$

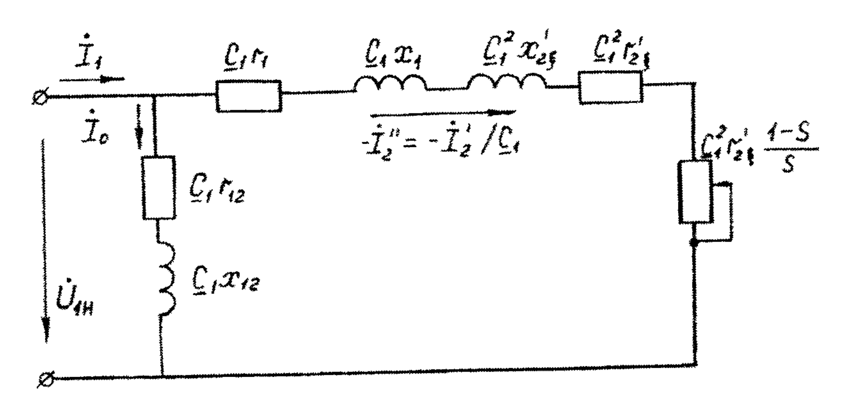


Рис. 8.6. Точная Г-образная электрическая схема замещения асинхронного двигателя при учете эффекта вытеснения тока

$$X_{S\xi} = b_\xi - \frac{b' r'_{2\xi}}{S}; \tag{8.53}$$

если $X_{S\xi} < 0$, то принимают

$$X_{S\xi} = 0, \tag{8.54}$$

так как по физической сути $X_{S\xi} \geqslant 0$.

$$Z_{S\xi} = \sqrt{R_{S\xi}^2 + X_{S\xi}^2}; \tag{8.55}$$

$$\cos\varphi'_{2\xi} = \frac{R_{S\xi}}{Z_{S\xi}}; \tag{8.56}$$

$$\sin\varphi'_{2\xi} = \frac{X_{S\xi}}{Z_{S\xi}}; \tag{8.57}$$

$$I''_{2\xi} = \frac{U_{1н}}{Z_{S\xi}};\tag{8.58}$$

$$I''_{2а\xi} = I''_{2\xi}\cos\varphi'_{2\xi};\tag{8.59}$$

$$I''_{2р\xi} = I''_{2\xi}\sin\varphi'_{2\xi};\tag{8.60}$$

$$I_{1а\xi} = I_{0а} + I''_{2а\xi};\tag{8.61}$$

$$I_{1р\xi} = I_{0р} + I''_{2р\xi};\tag{8.62}$$

$$I_{1\xi} = \sqrt{I^2_{1а\xi} + I^2_{1р\xi}}.\tag{8.63}$$

Если $S = 1$, то $I_{1\xi} = I_{1п}$. (8.64)

Расчет данных с учетом эффекта вытеснения тока закончен.

Информационное окно № 8.11
Результаты расчета токов ротора и статора с учетом эффекта вытеснения тока

Данные расчета при скольжении $S = \ldots$

$I_2 = \ldots$ А	(8.46)	$(x'_{2\xi} \le x'_2)$	
$\lambda_{п2\xi} = \ldots$	(8.47)	$a_\xi = \ldots$ Ом	(8.50)
$(\lambda_{п2\xi} < \lambda_{п2})$		$b_\xi = \ldots$ Ом	(8.51)
$K_x = \ldots$	(8.48)	$R_{S\xi} = \ldots$ Ом	(8.52)
$(K_x \leqslant 1)$		$X_{S\xi} = \ldots$ Ом	(8.53)
$x'_{2\xi} = \ldots$	(8.49)	$(X_{S\xi} \geqslant 0)$	

$X_{S\xi}=0$ (8.54)

(если $X_{S\xi}<0$)

$Z_{S\xi}=\ldots$ Ом (8.55)

$\cos\varphi'_{2\xi}=\ldots$ (8.56)

$\sin\varphi'_{2\xi}=\ldots$ (8.57)

$I''_{2\xi}=\ldots$ А (8.58)

$I''_{2a\xi}=\ldots$ А (8.59)

$I''_{2p\xi}=\ldots$ А (8.60)

$I_{1a\xi}=\ldots$ А (8.61)

$I_{1p\xi}=\ldots$ А (8.62)

$I_{1\xi}=\ldots$ А (8.63)

$I_{1п}=\ldots$ А (8.64)

(S=1)

Корректировка расчета: (Да — информ. окно № 8.3. Нет — формула (8.65), информ. окно № 8.12?).

Блок расчета пусковых характеристик с учетом эффектов вытеснения тока и насыщения

При увеличении скольжения свыше критического и в пусковых режимах токи в обмотках возрастают и потоки рассеяния увеличиваются. Коронки зубцов статора и ротора в машинах средней и большой мощности в большинстве случаев оказываются сильно насыщенными.

Насыщение коронок зубцов (рис. 8.7) приводит к увеличению магнитного сопротивлеиия для части потока рассеяния, магиитные линии которого замыкаются через верхнюю часть паза. Поэтому коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния уменьшается. Несколько снижается также магнитная проводимость диффереициального рассеяния. На коэффициент магнитиой проводимости лобового рассеяния насыщение стали потоками рассеяиия влияния не оказывает.

Умеиьшение потока пазового рассеяиия из-за насыщеиия приближенно учитывают введеиием дополнительного раскрытия паза, равного $C_э$. Дополнительное раскрытие $C_э$ прииимается таким, чтобы его магиитное сопротивление потоку рассеяния было равно магнитному сопротивлению насыщенных участков зубцов. При этом условии

можно использовать для расчета коэффициента магнитной проводимости паза с учетом насыщения обычные формулы, предполагая, что $\mu_{ст} = \infty$. Уменьшение $\lambda_п$ из-за насыщения участков зубцов ($\Delta\lambda_{п.нас}$) будет определяться величиной $C_э$. Таким образом, значение $C_э$ зависит от уровня насыщения верхней части зубцов потоками рассеяния, и следовательно, от МДС паза, т. е. от тока в обмотке. Так как ток обмотки в свою очередь зависит от индуктивного сопротивления, определяемого магнитной проводимостью, то расчет приходится проводить методом последовательных приближений.

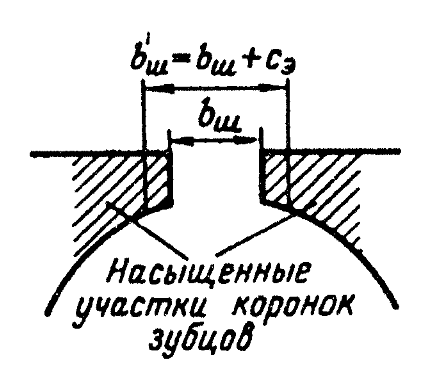


Рис. 8.7. Насыщение участков коронок зубцов потоком рассеяния

Поэтому расчетный блок начинается с составления прогноза изменения коэффициента насыщения в функции скольжения ($k_{нас} = f(S)$). Правильное (достоверное) составление этого прогноза для пользователя является одним из наиболее ответственных моментов при расчете пусковых характеристик. Это объясняется тем, что при неточном составлении прогноза $k_{нас}=f(S)$, вычисленное значеиие фазного тока статора в конце расчета, не совпадает с предварительно принятым. При этом возникает необходимость повторного расчета при скорректированной функции $k_{нас}=f(S)$.

Такой метод расчета называется методом последовательных приближений и продолжается до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность вычислений (в данном случае ±10 %).

Первоначальный близкий к достоверному прогноз значения коэффициента насыщения при $S = 1$ может быть составлен по величине полного тока паза статора, А:

$$I_{\text{паз}} = \frac{I_{1\text{п}} u_{\text{п}}}{a}, \tag{8.65}$$

где $I_{1\text{п}}$ — фазный ток статора при $S = 1$ (формула (8.64)).

Информационное окно № 8.12
Прогноз коэффициента насыщения при скольжении S=1

Информация, необходимая для принятия решения:

— значение скольжения S=...;

— полный ток паза статора $I_{\text{паз}}$=...А.

Достоверные значения коэффициента иасыщения:

— если $I_{\text{паз}} \geqslant (2000–2500)$ А при $S = 1$, то $k_{\text{нас}(1)}=1{,}4–1{,}5$;

— если $I_{\text{паз}} \approx (1400–1900)$ А при $S = 1$, то $k_{\text{нас}(1)}=1{,}25–1{,}35$;

— если $I_{\text{паз}} \leqslant (1000–1200)$ А при $S = 1$, то $k_{\text{нас}(1)}=1{,}15–1{,}2$.

Введите прогнозируемое значение коэффициента насыщения (вводится только при расчете, когда S =1).

$k_{\text{нас}(1)}$=...?

(S=1)

Если $S \neq 1$, то значение $k_{\text{нас}(1)}$ в ЭВМ не вводится, а $k_{\text{нас}}$ рассчитывается по формуле (8.66).

Корректировка расчета: (Да — иформ. окно № 8.12. Нет — формулы (8.66)—(8.70), информ. окно № 8.13).

При других значениях скольжений коэффициент насыщения рассчитывается по формуле

$$k_{нас} = k_{нас(1)} \frac{I_{1\xi}}{I_{1п}}, \tag{8.66}$$

где $I_{1\xi}$ — значение фазного тока статора при заданном скольжении;

$I_{1п} = I_{1\xi}$ при $S = 1$ (см. формулу (8.64)).

Если по формуле (8.66) $k_{нас}$ получается меньше единицы, то он принимается равным единице, так как по физической сути $k_{нас} \geqslant 1$.

$$\text{Если } k_{нас} < 1, \text{ то } k_{нас} = 1. \tag{8.67}$$

Пользователь путем последовательных приближений, т. е. путем вариаций значения $k_{нас(1)}$, добивается заданной точности вычислений ($\Delta I_{нас}\% \leqslant 10$ % при $S = 1$). После достижения заданной точности вычислений (получения достоверного закона $k_{нас}=f(S)$) пользователь продолжает решение задачи, контролируя при этом отклонение $\Delta I_{нас}\%$. Если это отклонение по ходу решения задачи увеличивается и начинает по модулю превышать 10 %, то пользователь должен изменить закон $k_{нас}(S)$ путем коррекции значения $k_{нас(1)}$ и повторить расчеты.

Прогнозируемое значение фазного тока статора при пуске с учетом вытеснения тока и насыщения вычисляется по формуле, А:

$$I_{1нас.пр.} = k_{нас} \cdot I_{1\xi}. \tag{8.68}$$

Средняя МДС обмотки, отнесенная к одному пазу статора, вычисляется по выражению, А:

$$F_{п\,ср} = 0{,}7 \frac{I_{1нас.пр} u_п}{a} \left(k'_\beta + k_{y1} k_{об1} \frac{Z_1}{Z_2} \right). \tag{8.69}$$

Значение фиктивной индукции потока рассеяния в воздушном зазоре определяется по выражению, Тл:

$$B_{\phi\delta} = F_{п.ср} \cdot 10^{-3} / (1{,}6\delta C_N). \tag{8.70}$$

Информационное окно № 8.13
Определение нелинейной функции $x_б$

Значение фиктивной индукции $B_{Фб}$=... Тл. (достоверный диапазон 0< $B_{Фб}$<10 Тл).

По рис. 8.8 определите значение нелинейной функции $x_б$, характеризующей отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния ненасыщенного асинхронного двигателя.

Значение $x_б$ введите в ЭВМ

$x_б = ...?$

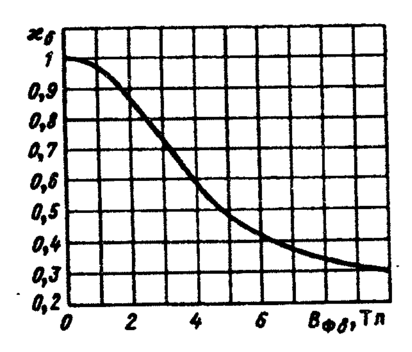


Рис. 8.8. Функция $x_б$ в зависимости от фиктивной индукции $B_{Фб}$

Корректировка расчета: (Да — информ. окно № 8.13. Нет — формулы (8.71)—(8.114), информ. окио № 8.14?).

Расчет пусковых токов при учете эффектов вытеснения тока и насыщения

Значение дополнительного раскрытия паза статора рассчитывается по формуле

$$C_{э1} = (t_1 - b_{ш(1)})(1 - x_б). \qquad (8.71)$$

Вызванное насыщением от полей рассеяния уменьшение коэффициента магнитной проводимости пазового рассеяния трапецеидального полузакрытого паза статора определяется по выражению

$$\Delta\lambda_{п1нас} = \frac{h_{ш(1)} + 0{,}58h_{к(1)}}{b_{ш(1)}} \cdot \frac{C_{э1}}{C_{э1} + 1{,}5b_{ш(1)}}. \tag{8.72}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния статора при насыщении находится по зависимости:

$$\lambda_{п1нас} = \lambda_{п1} - \Delta\lambda_{п1нас}, \tag{8.73}$$

а коэффициент дифференциальной проводимости по формуле

$$\lambda_{д1нас} = \chi_{\delta}\lambda_{д1}. \tag{8.74}$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора с учетом насыщения рассчитывается по выражению, Ом:

$$x_{1нас} = x_1\frac{\lambda_{п1нас} + \lambda_{д1нас} + \lambda_{л1}}{\lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}}, \tag{8.75}$$

а относительное значение этого сопротивления — по формуле

$$x_{1нас*} = \frac{x_{1нас}}{x_1} = \frac{\lambda_{п1нас} + \lambda_{д1нас} + \lambda_{л1}}{\lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}}. \tag{8.76}$$

По такой же методике рассчитывается индуктивное сопротивление обмотки ротора с учетом вытеснения тока и насыщения:

$$C_{э2} = (t_2 - b_{ш(2)})(1 - \chi_{\delta}); \tag{8.77}$$

$$\Delta\lambda_{п2нас} = \frac{h_{ш(2)}}{b_{ш(2)}} \cdot \frac{C_{э2}}{C_{э2} + b_{ш(2)}}; \tag{8.78}$$

$$\lambda_{п2\xi нас} = \lambda_{п2\xi} - \Delta\lambda_{п2нас};\qquad(8.79)$$

$$\lambda_{д2нас} = \chi_\delta \lambda_{д2};\qquad(8.80)$$

$$x'_{2\xi нас} = x'_2 \frac{\lambda_{п2\xi нас} + \lambda_{д2нас} + \lambda_{л2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}};\qquad(8.81)$$

$$x'_{2\xi нас*} = \frac{x'_{2\xi нас}}{x'_2} = \frac{\lambda_{п2\xi нас} + \lambda_{д2нас} + \lambda_{л2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}}.\qquad(8.82)$$

Далее вычисляются активные и реактивные составляющие и модуль коэффициента $C_{1п}$ при учете насыщения.

$$C_{1ап} = \frac{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12п}(x_{1нас} + x_{12п})}{r_{12}^2 + x_{12п}^2};\qquad(8.83)$$

$$C_{1рп} = \frac{r_1 x_{12п} - r_{12} x_{1нас}}{r_{12}^2 + x_{12п}^2};\qquad(8.84)$$

$$C_{1п} = \sqrt{C_{1ап}^2 + C_{1рп}^2}.\qquad(8.85)$$

Значение фазного тока статора в период пуска при учете эффектов вытеснения тока и насыщения рассчитывается по точной Г-образной электрической схеме замещения (рис. 8.9).

Так как методика расчета остается прежней, ниже приводятся все формулы без комментария

$$R_{mп} = C_{1ап} r_{12} + C_{1рп} x_{12п};\qquad(8.86)$$

$$X_{mп} = C_{1ап} x_{12п} - C_{рп} r_{12};\qquad(8.87)$$

$$Z_{mп} = \sqrt{R_{mп}^2 + X_{mп}^2};\qquad(8.88)$$

$$I_{0п} = U_{1н} / Z_{mп};\qquad(8.89)$$

$$\cos\varphi_{0\text{п}} = R_{m\text{п}} / Z_{m\text{п}}; \tag{8.90}$$

$$\sin\varphi_{0\text{п}} = X_{m\text{п}} / Z_{m\text{п}}; \tag{8.91}$$

$$I_{0\text{ап}} = I_{0\text{п}} \cos\varphi_{0\text{п}}; \tag{8.92}$$

$$I_{0\text{рп}} = I_{0\text{п}} \sin\varphi_{0\text{п}}; \tag{8.93}$$

$$a'_{\text{п}} = C^2_{1\text{ап}} - C^2_{1\text{рп}}; \tag{8.94}$$

$$b'_{\text{п}} = 2C_{1\text{ап}}C_{1\text{рп}}; \tag{8.95}$$

$$a_{\text{нас}} = C_{1\text{ап}} r_1 + C_{1\text{рп}} x_{1\text{нас}} + b'_{\text{п}} x'_{2\xi\,\text{нас}}; \tag{8.96}$$

$$b_{\text{нас}} = C_{1\text{ап}} x_{1\text{нас}} - C_{1\text{рп}} r_1 + a'_{\text{п}} x'_{2\xi\,\text{нас}}; \tag{8.97}$$

$$R_{S\,\text{нас}} = a_{\text{нас}} + a'_{\text{п}} r'_{2\xi} / S; \tag{8.98}$$

$$X_{S\,\text{нас}} = b_{\text{нас}} - b'_{\text{п}} r'_{2\xi} / S. \tag{8.99}$$

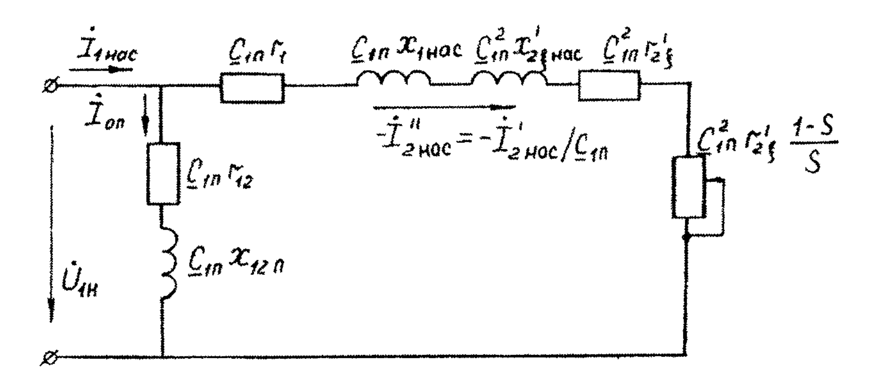


Рис. 8.9. Точная Г-образная электрическая схема замещения асинхронного двигателя при учете эффекта вытеснения тока и насыщения

Если $X_{S\,\text{нас}} < 0$, то принимается $X_{s\,\text{нас}} = 0$; (8.100)

$$Z_{S\ нас} = \sqrt{R_{S\ нас}^2 + X_{S\ нас}^2}\ ; \tag{8.101}$$

$$\cos\varphi'_{2нас} = R_{S\ нас} / Z_{S\ нас}\ ; \tag{8.102}$$

$$\sin\varphi'_{2нас} = X_{S\ нас} / Z_{S\ нас}\ ; \tag{8.103}$$

$$I''_{2нас} = U_{1н} / Z_{S\ нас}\ ; \tag{8.104}$$

$$I''_{2а\,нас} = I''_{2нас} \cdot \cos\varphi'_{2нас}\ ; \tag{8.105}$$

$$I_{2р\,нас} = I''_{2нас} \sin\varphi'_{2нас}\ ; \tag{8.106}$$

$$I_{1а\,нас} = I_{0ап} + I''_{2а\,нас}\ ; \tag{8.107}$$

$$I_{1рнас} = I_{0рп} + I''_{2рнас}\ ; \tag{8.108}$$

$$I_{1нас} = \sqrt{I_{1а\,нас}^2 + I_{1р\,нас}^2}\ . \tag{8.109}$$

Далее, согласно методу последовательных приближений, осуществляется основная проверка правильности составления прогноза.

Эта проверка заключается в вычислении ошибки расчета:

$$\Delta I_{1нас}\% = \frac{I_{1нас} - I_{1нас.пр.}}{I_{1нас}} \cdot 100\ . \tag{8.110}$$

Если $|\Delta I_{1нас}\%| > 10\%$, то необходимо скорректировать значение $k_{нас(1)}$ и повторить расчет.

Относительное значение пускового тока статора вычисляется по формуле

$$I_{1п*} = I_{1нас} / I_{1н}\ . \tag{8.111}$$

Согласно стандарту, $I_{1п*} \leqslant 7{,}5$ при S=1.

Далее рассчитываются электромагнитные моменты и скорости вращения ротора, необходимые для построения механической характеристики асинхронного двигателя.

Электромагнитный момент в пусковом режиме, Н·м

$$M_{\text{эм п}} = \frac{p\,m_1}{2\pi f_{1\text{н}}}(C_{1\text{п}} I''_{2\text{нас}})^2 \frac{r'_{2\xi}}{S} = \frac{2\,p\,m_1}{4\pi f_{1\text{н}}}(C_{1\text{п}} I''_{2\text{нас}})^2 \frac{r'_{2\xi}}{S}. \qquad (8.112)$$

Относительное значение электромагнитного момента в пусковом режиме

$$M_{\text{п}*} = \frac{M_{\text{эм.п}}}{M_{\text{эм.н}}} = K_R \left(\frac{C_{1\text{п}} I''_{2\text{нас}}}{I'_{2\text{н}}} \right)^2 \left(\frac{S_{\text{н}}}{S} \right). \qquad (8.113)$$

Скорость вращения ротора в пусковом режиме, об/мин:

$$n_2 = n_1 (1 - S), \qquad (8.114)$$

где n_1 — (см. формулу (8.29)).

Информационное окно № 8.14
Результаты расчета при учете эффектов вытеснения тока и насыщения

Данные расчета при скольжении S =...

$C_{э1}$=...	(8.71)	$C_{э2}$=...	(8.77)
$\Delta\lambda_{\text{п1нас}}$=...	(8.72)	$\Delta\lambda_{\text{п2нас}}$=...	(8.78)
$\lambda_{\text{п1нас}}$=...	(8.73)	$\lambda_{\text{п2}\xi\text{нас}}$=...	(8.79)
$\lambda_{\text{д1нас}}$=...	(8.74)	$\lambda_{\text{д2нас}}$=...	(8.80)
$x_{1\text{нас}}$=... Ом	(8.75)	$x'_{2\xi\,\text{нас}}$ = ...Ом	(8.81)
$x_{1\text{нас}*}$=... о. е.	(8.76)		

$x'_{2\xi нас*} = \ldots$ Ом (8.82)

$C_{1ап}=\ldots$ (8.83)

$C_{1рп}=\ldots$ (8.84)

$C_{1п}=\ldots$ (8.85)

$R_{mп}=\ldots$ Ом (8.86)

$X_{mп}=\ldots$ Ом (8.87)

$Z_{mп}=\ldots$ Ом (8.88)

$I_{оп}=\ldots$А (8.89)

$\cos\varphi_{оп}=\ldots$ (8.90)

$\sin\varphi_{оп}=\ldots$ (8.91)

$I_{0ап}=\ldots$А (8.92)

$I_{0рп}=\ldots$А (8.93)

$a'_{п}=\ldots$ (8.94)

$b'_{п}=\ldots$А (8.95)

$a_{нас}=\ldots$Ом (8.96)

$b_{нас}=\ldots$Ом (8.97)

$R_{Sнас}=\ldots$Ом (8.98)

$X_{Sнас}=\ldots$Ом (8.99)

$X_{Sнас}=\ldots$Ом (8.100)

(если $X_{Sнас}<0$)

$Z_{Sнас}=\ldots$ Ом (8.101)

$\cos\varphi'_{2нас}=\ldots$ (8.102)

$\sin\varphi'_{2нас}=\ldots$ (8.103)

$I''_{2нас}=\ldots$А (8.104)

$I''_{2aнас}=\ldots$А (8.105)

$I''_{2pнас}=\ldots$А (8.106)

$I_{1a\ нас}=\ldots$А (8.107)

$I_{1p\ нас}=\ldots$А (8.108)

$I_{1нас}=\ldots$А (8.109)

Основная проверка правильности составленного прогноза о значении коэффициента насыщения:

— полученная точность расчета пускового тока

$$\Delta I_{1нас}\%=\ldots; \quad (8.110)$$

— заданная точиость расчета $|\Delta I_{1нас}\%| \le 10\ \%$.

Если $|\Delta I_{1нас}\%| > 10\ \%$, то пользователь должен скорректировать значение коэффициента насыщения и повторить расчет. При коррекции пользователь должен учитывать величину и знак ошибки расчета. Если ошибка расчета отрицательна, то надо уменьшать значение $k_{нас(1)}$, а если положительна, то — увеличивать. Расчет повторяется до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность вычислений $|\Delta I_{1нас}\%| \leqslant 10\ \%$.

$$I_{1п*}=\ldots\text{о. е.} \qquad (8.111)$$

$$(I_{1п*}\leqslant 7{,}5\ \text{о. е. при}\ S=1)$$

$$М_{эм.п}=\ldots\text{Н·м} \qquad (8.112)$$

$$М_{п*}=\ldots\ \text{о. е.} \qquad (8.113)$$

$$n_2=\ldots\ \text{об/мин} \qquad (8.114)$$

Корректировка расчета: (Да — информ. окно № 8.12. Нет — информ. окно № 8.15?).

Информационное окно № 8.15
Расчет точного значения критического скольжения

Информация, необходимая для принятия решения:

— предварительное значение критического скольжения

$$S_{кр.пред.}=\ldots \qquad (8.27);$$

— значение скольжения, при котором произведен расчет (значение, введенное пользователем в информ. окно № 8.3).

$$S=\ldots.$$

$S\neq S_{кр.пред.}$ — Да? Возвращение в информ. окно № 8.3 для расчета пусковых характеристик при следующем значении скольжения

S=$S_{кр.пред}$ – Да? Расчет точного значения критического скольжения (формулы (8.115)–(8.121), информ. окно № 8.16)

S=0,4$S_{кр}$ – Да?

Расчет пусковых характеристик закончен.

Информ.окно № 8.17

если $S = S_{кр\ пред}$, то:

$$C_{1п} = C_{1кр}; \qquad (8.115)$$

$$r'_{2\xi} = r'_{2кр}; \qquad (8.116)$$

$$x_{1нас} = x_{1кр}; \qquad (8.117)$$

$$x'_{2\xi нас} = x'_{2кр}. \qquad (8.118)$$

Точное значение критического скольжения вычисляется по формуле

$$S_{кр} = \frac{C_{1кр} r'_{2кр}}{\sqrt{r_1^2 + \left(x_{1кр} + C_{1кр} x'_{2кр}\right)^2}} . \qquad (8.119)$$

$$\Delta S_{1кр} = 0{,}6\ S_{кр}. \qquad (8.120)$$

$$\Delta S_{2кр} = 0{,}4\ S_{кр}\ . \qquad (8.121)$$

Информационное окно № 8.16
Результаты расчета критического скольжения

$$C_{1кр} = \ldots \qquad (8.115)$$

$$r'_{2кр} = \ldots\ Ом \qquad (8.116)$$

$$x_{1кр}=\ldots Ом \quad (8.117)$$

$$x'_{2кр} = \ldots Ом \quad (8.118)$$

$$S_{кр}=\ldots \quad (8.119)$$

$$(S_{кр} > S_{кр.пред})$$

$$\Delta S_{1кр}=0,6\ S_{кр}=\ldots \quad (8.120)$$

$$\Delta S_{2кр}=0,4\ S_{кр}=\ldots \quad (8.121)$$

Полученное значение критического скольжения введите в информационное окно № 8.3 и проведите расчет перегрузочной способности асинхронного двигателя. При критическом скольжении $М_{п*}=K_м$ и значение электромагнитного момента $М_{эм.п}$ должно быть по величине больше, чем при других значениях скольжений (максимум зависимости $М_{эм}=f(S)$), т. е. $М_{эм.п.}=М_{эм.max}$ при $S=S_{кр}$.

После этого рассчитайте пусковые характеристики еще для двух значений скольжений — 0,6 $S_{кр}$ и 0,4 $S_{кр}$.

Корректировка расчета: (Да — иинформ. окно № 8.1. Нет — информ. окно № 8.3?).

Комментарий. При расчете пусковых характеристик асинхронного двигателя пользователь должен следить за выполнением требований стандарта и технического задания, согласно которым $М_{п*} \geqslant 1,2$; $I_{1п*} \leqslant 7,5$ при $S = 1$ и $(М_{п.*} = М_{max*}) \geqslant 1,6$ при $S = S_{кр}$.

Одним из эффективных путей увеличения начального пускового момента является изменение конфигурации паза ротора с целью усиления влияиия эффекта вытеснения тока.

Если перегрузочная способность двигателя получилась по расчету меньше требуемой, то пользователь должен скорректировать расчет путем изменения конфигурации пазов статора и ротора.

При проведении коррекции необходимо учитывать, что при критическом скольжении эффекты вытеснения тока и насыщения практически отсутствуют, а максимальный момент обратно пропорционалеи сопротивлению $x_к$:

$$M_{max} \approx \frac{m_1 p}{4\pi f_1} \cdot \frac{U_1^2}{x_к}, \text{ где } x_к = x_{1нас} + C_{1п} x'_{2\xi нас} \text{ при } S_{кр}.$$

Следовательио, для повышения максимального момента необходимо уменьшить значение $x_к$:

$$x_{к*} = x_к (I_{1н} / U_{1н}) = \Delta \frac{A}{B_\delta},$$

откуда

$$x_к = \Delta \frac{A}{B_\delta} \cdot \frac{U_{1н}}{I_{1н}},$$

где Δ — козффициент, характеризующий рассеяиие ($\Delta \approx const$ при заданных $P_{1н}$, $U_{1н}$, τ);

A — линейная нагрузка;

B_δ — индукция в воздушном зазоре.

Сохраняя $AB_\delta = const$, необходимо увеличить B_δ и уменьшнть A с целью повышения M_{max}.

Также $x_к$ можно выразить следующим образом:

$$x_к = \frac{K}{Z_1}(\lambda_{п1нас} + \lambda_{д1нас} + \lambda_{л1}) + \frac{K'}{Z_2}(\lambda_{п2\xi нас} + \lambda_{д2нас} + \lambda_{л2}),$$

где K и K' — постоянные коэффициенты; Z_1 и Z_2 — количество пазов статора и ротора.

Коэффициенты магнитной проводимости пазового рассеяния обмоток статора и ротора зависят от геометрических размеров пазов. Следовательно, изменяя конфигурацию пазов при сохранеиии их площадей и геометрические раскрытия пазов, можно уменьшить $\lambda_{п1нас}$ и $\lambda_{п2\xi нас}$.

Коэффициенты дифференциального рассеяния обмоток статора и ротора можно уменьшить, увеличивая воздушный зазор.

Значения коэффициентов магнитной проводимости лобового рассеяния практически изменить не удается.

Информационное окно № 8.17
Расчет пусковых характеристик асинхронного двигателя закончен. Проверка введенных данных

Проверьте данные, введенные в начале расчета:

Число, месяц, год	...
Ваши фамилия, инициалы	...
Группа	...
Руководитель, должность, звание, фамилия, инициалы	...

Данные технического задания на проектирование асинхрониого двигателя:

1. Тип двигателя	Асинхронный с короткозамкнутым ротором, обмотка ротора «беличья клетка» (заливка алюминием)
2. Назначение	Общего исполнения или взрывозащищенный
3. Номинальный режим работы	$S1$
4. Номинальная мощность	$P_{2н}$=... кВт
5. Номинальное напряжение	Y/Δ,... В
6. Число полюсов	$2p$ = ...
7. Базисная частота	$f_{1н}$=... Гц
8. Частоты сети, при которых рассчитываются рабочие характеристики двигателя	f_1=... Гц
9. Закон изменения напряжения или ЭДС статора в завнсимости от частоты	$U_1/U_{1н}$=... $E_1/E_{1н}$=...
10. Степень защиты от воздействия окружающей среды	*IP*...

11. Способ охлаждения	*IC*...
12. Исполнение по способу монтажа	*IM*...
13. Климатические условия	....
14. Класс нагревостойкости изоляции	*F*
15. Маркировка взрывозащиты	......

Данные асинхронного двигателя:		
1.	Номинальный фазный ток статора	$I_{1н}$=... А
2.	Приведенный к статору номинальный фазный ток ротора	$I'_{2н}$ = ...А
3.	Номинальное скольжение	$S_н$=..., о.е.
4.	Предварительное значение перегрузочной способности двигателя	$К_{м.пред.}$=...
5.	Высота оси вращения двигателя	h =... мм
Геометрические размеры паза ротора (рис. 8.1, *а*, *б*):		
6.		$h_{1(2)}$=... мм
7.		$b_{1(2)}$=... мм
8.		$b_{2(2)}$=... мм
9.		$b_{ш(2)}$=... мм
10.		$h_{ш(2)}$=... мм
11.		$h'_{ш(2)}$=... мм
Геометрические размеры паза статора (см. рис. 8.1, *в*):		
12.		$b_{ш(1)}$=... мм
13.		$h_{ш(1)}$=... мм
14.		$h_{к(1)}$=... мм
Параметры Г-образной электрической схемы замещения:		
15.	Фиктивное активное сопротивление, характеризующее магнитные потери	r_{12}=...Ом
16.	Сопротивление взаимоиндукции	x_{12}=... Ом
17.	Активное сопротивление фазы статора при расчетной температуре	r_1=... Ом

18.	Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора	x_1=... Ом
19.	Приведенное к статору активное сопротивление фазы ротора	r'_2=... Ом
20.	Приведениое к статору индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора	x'_2=... Ом
Данные беличьей клетки ротора:		
21.	Активное сопротивление стержня ротора	r_c=...10^6 Ом
22.	Активное сопротивление фазы ротора	r_2=...10^6 Ом
23.	Число пазов ротора	z_2=... паз
24.	Зубцовое деление ротора	t_2=... мм
Данные обмотки статора:		
25.	Число параллельных ветвей в фазе	a=...
26.	Число пазов статора	z_1=... паз
27.	Число витков в фазе обмотки статора	W_1=... вит
28.	Число эффективных проводников в пазу статора	$u_п$=...
29.	Полюсное деление	τ =... паз
30.	Шаг обмотки	y =... паз
31.	Зубцовое деление статора	t_1=...мм
32.	Коэффициент укорочения шага обмотки статора	k_{y1}=...
33.	Обмоточный коэффициент обмотки статора	$k_{об1}$=...
Данные магнитной системы асинхронного двигателя:		
34.	Воздушный зазор	δ =...мм
35.	Коэффициент насыщения магнитной цепи в номинальном режиме	k_μ=...
36.	Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния статора	$\lambda_{п1}$=...

37.	Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния статора	$\lambda_{д1}$=...
38.	Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния статора	$\lambda_{л1}$=...
39.	Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора	$\lambda_{п2}$=...
40.	Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора	$\lambda_{д2}$=...
41.	Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния ротора	$\lambda_{л2}$=...

Постоянные величины, введенные или вычисленные в процессе решения задачи $I_{п.пред*}$ = ... (табл. 8.1)

$$I_{1п}=\ldots \text{ А при } S=1 \tag{8.64}$$

$$I_{паз} = \ldots \text{А} \tag{8.65}$$

$$k_{нас(1)} = \ldots \text{при } (S=1)$$

(выбор по значению $I_{паз}$ при $S = 1$)

$$C_{1.кр} = \ldots \tag{8.115}$$

$$r'_{2\,кр} = \ldots \text{ Ом} \tag{8.116}$$

$$x_{1\,кр} = \ldots \text{ Ом} \tag{8.117}$$

$$x'_{2\,кр} = \ldots \text{ Ом} \tag{8.118}$$

$$S_{кр} = \ldots \tag{8.119}$$

$$\Delta S_{1кр} = 0{,}6\, S_{кр} = \ldots \tag{8.120}$$

$$\Delta S_{1кр} = 0,4\ S_{кр} = \ldots \qquad (8.121)$$

Просмотр данных закончен.

Повторить: (Да — информ. окно № 8.17?).

Результаты расчета величин, не зависящих от скольжения: (Да — информ. окно 8.18?).

Информационное окно № 8.18
Данные блока расчета величин, не зависящих от значения скольжения

$h_{c(2)}=\ldots$ мм (8.1)

$h_{0(2)}=\ldots$ мм (8.2)

$q_{c(2)}=\ldots$ мм^2 (8.3)

$h_{r(1)}=\ldots$ мм (8.4)

$h_{r(2)}=\ldots$ мм (8.5)

$\nu_i=\ldots$ (8.6)

$I_{2H}=\ldots$A (8.7)

$\lambda'_{п2}=\ldots$ (8.8)

$\beta_1=\ldots$ (8.9)

Однослойная обмотка $\beta_1=1$;

двухслойная обмотка:

$\beta_1=0,58$—$0,63$ при $2p=2$,

$\beta_1=0,78$—$0,83$ при $2p>2$).

$k'_\beta=\ldots$ (8.10)

($\beta_1=1$)

$k'_\beta=\ldots$ (8.11)

($0,66<\beta_1<1$)

$k'_\beta=\ldots$ (8.12)

($0,33\leqslant\beta_1<0,66$)

$C_N=\ldots$ (8.13)

$C_{1a}=\ldots$ (8.14)

$C_{1p}=\ldots$ (8.15)

$C_1=\ldots$ (8.16)

$R_m=\ldots$ Ом (8.17)

$X_m=\ldots$ Ом (8.18)

$Z_m=\ldots$ Ом (8.19)

$\cos\varphi_0=\ldots$ (8.20)

$\sin\varphi_0=\ldots$ (8.21)

I_0= … А (8.22)

I_{0a}=…А (8.23)

I_{0p}=…А (8.24)

a' = … (8.25)

b' = … (8.26)

$S_{кр.пред.}$=… (8.27)

$x_{12п}$=…Ом (8.28)

n_1=…об/мин (8.29)

$M_{эм.н}$=…Н·м (8.30)

Просмотр данных закончен.

Повторить: (Да – информ. окно № 8.18?).

Результаты расчета пусковых характеристик:

(Да — информ. окно № 8.19?).

Информационное окно № 8.19
Результаты расчета пусковых характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Таблица 8.2

Данные расчета пусковых характеристик

Обозначения величин, номера формул, таблиц, рисунков	Скольжение								
	1	0,8	0,6	0,4	0,2	$S_{кр.пред}$	$S_{кр}$	0,6 $S_{кр}$	0,4 $S_{кр}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ξ = … (8.31)									
φ = … (табл. 8.2) ($1 \leq \xi \leq 4$)									
φ=… (8.32) ($\xi < 1$)									
φ=… (8.33) ($\xi > 4$)									
h_r = …мм (8.34)									

Продолжение табл. 8.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
b_r = … мм (8.35) ($h_{r(1)} \leqslant h_r \leqslant h_{r(2)}$)									
q_r = … мм^2 (8.36) ($h_{r(1)} \leqslant h_r \leqslant h_{r(2)}$)									
q_r = … мм^2 (8.37) ($h_r > h_{r(2)}$)									
$\varphi_{кр}$ = … (см. рис. 8.2) ($h_r < h_{r(1)}$) ($1 \leqslant \xi \leqslant 4$)									
$\varphi_{кр}$ = … (8.38) ($h_r < h_{r(1)}$) ($\xi < 1$)									
$\varphi_{кр}$ = … (8.39) ($h_r < h_{r(1)}$) ($\xi > 4$)									
q_r = … мм^2 (8.40) ($h_r < h_{r(1)}$)									
k_r = … (8.41) ($k_r \geqslant 1$)									
$k_r = 1$ (8.42) ($k_r < 1$)									
K_R = … (8.43) ($K_R \geqslant 1$)									
$r'_{2\xi}$ = … Ом (8.44)									
φ' =… (см. рис. 8.3.) ($0 \leqslant \xi \leqslant 4$)									
φ' =… (8.45) ($\xi > 4$)									
I_2 =… А (8.46)									
$\lambda_{п2\xi}$ = … (8.47) ($\lambda_{п2\xi} \leqslant \lambda_{п2}$)									
K_x = … (8.48) ($K_x \leqslant 1$)									
$x'_{2\xi}$ = …Ом (8.49)									
a_ξ = … Ом (8.50)									
b_ξ = … Ом (8.51)									
$R_{S\xi}$ = …Ом (8.52)									
$X_{S\xi}$ = …Ом (8.53) ($X_{S\xi} \geqslant 0$)									
$X_{S\xi}$ =0 (8.54) (если $X_{S\xi} < 0$)									
$Z_{S\xi}$ = 0 Ом (8.55)									

Продолжение табл. 8.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\cos\varphi'_{2\xi}$ = … (8.56)									
$\sin\varphi'_{2\xi}$ = … (8.57)									
$I''_{2\xi}$ = … А (8.58)									
$I''_{2a\xi}$ = … А (8.59)									
$I''_{2p\xi}$ = … А (8.60)									
$I_{1a\xi}$ = …А (8.61)									
$I_{1p\xi}$ = … А (8.62)									
$I_{1\xi}$ = … А (8.63)									
$k_{нас}$ =… (8.66) ($k_{нас} \geqslant 1$)									
$k_{нас}$=1 (8.67) (если $k_{нас}$<1)									
$I_{1\,нас\,пр}$ =… А (8.68)									
$F_{п\,ср}$ = …А (8.69)									
$B_{ф\delta}$ = …Тл (8.70)									
χ_δ = … (см. рис. 8.6)									
$C_{э1}$ = … (8.71)									
$\Delta\lambda_{п1\,нас}$ = … (8.72)									
$\lambda_{п1\,нас}$ = … (8.73)									
$\lambda_{д1\,нас}$ = … (8.74)									
$x_{1\,нас}$ = …Ом (8.75)									
$x_{1\,нас*}$ =…о. е (8.76)									
$C_{э2}$ = … (8.77)									
$\Delta\lambda_{п2\,нас}$ = … (8.78)									
$\lambda_{п2\xi\,нас}$ = … (8.79)									
$\lambda_{д2\,нас}$ = … (8.80)									
$x'_{2\xi\,нас}$ = …Ом (8.81)									
$x'_{2\xi\,нас*}$ = …о. е. (8.82)									
$C_{1ап}$ = … (8.83)									
$C_{1рп}$ = … (8.84)									
$C_{1п}$ = … (8.85)									
$R_{mп}$ = …Ом (8.86)									
$X_{mп}$ = …Ом (8.87)									
$Z_{mп}$ = …Ом (8.88)									
$I_{оп}$ = … А (8.89)									
$\cos\varphi_{оп}$ = … (8.90)									
$\sin\varphi_{оп}$ = … (8.91)									
$I_{оап}$ = … А (8.92)									
$I_{орп}$=…А (8.93)									
$a'_{п}$ = … (8.94)									

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$b'_п$ = … (8.95)									
$a_{нас}$ = … Ом (8.96)									
$b_{нас}$ = … Ом (8.97)									
$R_{S\,нас}$=…Ом (8.98)									
$X_{S\,нас}$=…Ом (8.99)									
$X_{S\,нас}$=0 (8.100) (если $X_{S\,нас}$<0)									
$Z_{S\,нас}$=…Ом (8.101)									
cos $\varphi'_{2\,нас}$=… (8.102)									
sin $\varphi'_{2\,нас}$=… (8.103)									
$I''_{2нас}$ = … А (8.104)									
$I''_{2а\,нас}$ = …А (8.105)									
$I''_{2р\,нас}$ = …А (8.106)									
$I_{1а\,нас}$ = …А (8.107)									
$I_{1р\,нас}$ = …А (8.108)									
$I_{1\,нас}$ = …А (8.109)									
$\Delta I_{1нас}$% = … % (8.110) ($\Delta I_{1нас}$%≤10%)									
$I_{1п*}$ = …о. е. (8.111) ($I_{1п*}$≤7,5 о. е. при S=1)									
$M_{эм.п}$ = … Н·м (8.112)									
$M_{п*}$ = …о. е. (8.113)									
n_2 = … об/мин (8.114)									

Просмотр результатов расчета пусковых характеристик закончен.

Повторить: (Да – информ. окно № 8.18?).

Печать: (Да – информ. окно № 8.17, № 8.18 и № 8.19).

После окончания расчета пользователь по полученным данным строит следующие зависимости $K_R=f(S)$; $k_{нас}=f(S)$; $K_x=f(S)$; $x_{1нас*}=f(S)$; $x'_{2\xi нас*}=f(S)$ (рис. 8.10) и пусковые характеристики асинхронного двигателя $M_{п*}=f(S)$ и $I_{1п*}=f(S)$ (рис. 8.11).

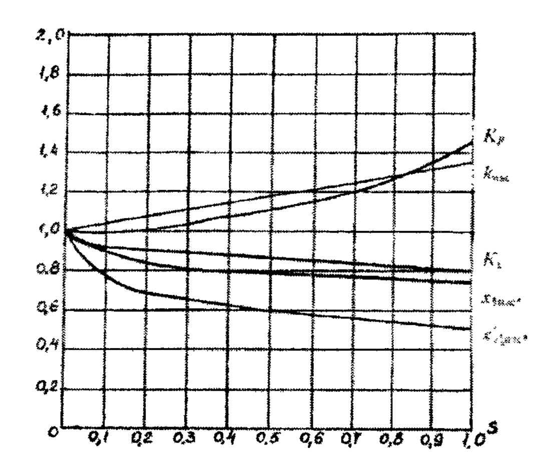


Рис. 8.10. Влияние эффектов вытеснения тока и насыщения на сопротивления фаз статора и ротора асинхронного двигателя

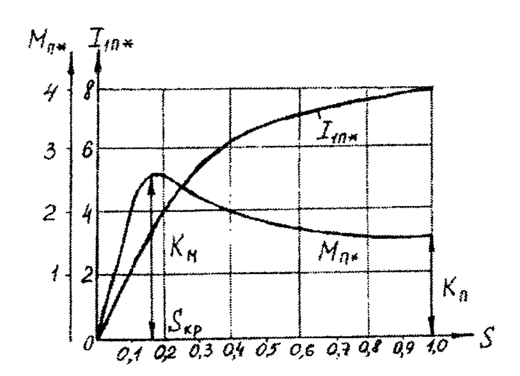


Рис. 8.11. Пусковые характеристики асинхронного двигателя:
$K_м$ — перегрузочная способность двигателя;
$K_п$ — кратность начального пускового момента двигателя

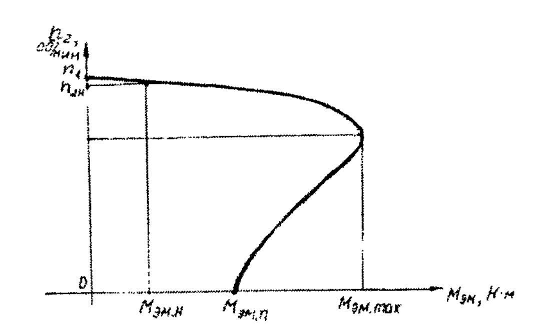


Рис. 8.12. Механическая характеристика асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Механическую характеристику $n_2 = f(M_{эм})$ пользователь строит по данным расчета рабочих и пусковых характеристик (рис 8.12).

9. АЛГОРИТМ ТЕПЛОВОГО И ВЕНТИЛЯЦИОННОГО РАСЧЕТОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ЭВМ (девятый фрагмент программы)

При электромеханическом преобразовании энергии часть электрической энергии в асинхронном двигателе преобразуется в тепловую, что ведет к повышению температуры активных и конструктивных элементов машины. Мощность тепловых потоков такова, что для их отвода в окружающую среду создают специальные принудительные системы охлаждения.

На первоначальной стадии проектирования достаточно достоверную оценку теплового режима двигателя дает приближенный метод теплового расчета, основанный на упрощенном представлении о характере тепловых связей между элемеитами электрической машины.

При применении этого метода используются средние значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности и теплопроводности изоляции, характерные для определенной конструкции и технологии производства двигателей данного типа, в частности, спроектированных на базе серий 4А и АИ.

Тепловой расчет проводят, используя значения потерь, полученных для номинального режима, но потери в обмотке статора увеличивают по сравнению с расчетными, исходя из предположения, что обмотка может быть нагрета до предельно допустимой для принятого класса нагревостойкости изоляции температуры (при классе нагревостойкости изоляции F — до 140 °C, при расчетной температуре 115 °C). При данном предположении коэффициент увеличения потерь для обмоток с классом нагревостойкости изоляции F:

$$k_\rho = \rho_{140^\circ} / \rho_{115^\circ} = 1{,}07 .$$

Информационное окно № 9.1
Тепловой и вентиляционный расчеты асинхронного двигателя. Ввод исходных данных

Число, месяц, год	...?
Ваши фамилия, инициалы	...?
Группа	...?
Руководитель, должность, звание, фамилия, инициалы	...?

Введите данные технического задания на проектирование асинхронного двигателя:

1. Тип двигателя	Асинхронный с короткозамкнутым ротором, обмотка ротора «беличья клетка» (заливка алюминием)
2. Назначение	Общего исполнения или взрывозащищенный
3. Номинальный режим работы	$S1$
4. Номинальная мощность	$P_{2н}$=... кВт
5. Номинальное напряжение	Y/Δ,... В
6. Число полюсов	$2p$ = ...
7. Базисная частота	$f_{1н}$=... Гц
8. Частоты сети, при которых рассчитываются рабочие характеристики двигателя	f_1=... Гц
9. Закон изменеиия напряжения или ЭДС статора в зависимости от частоты	$U_1/U_{1н}$=... $E_1/E_{1н}$=...
10. Степень защиты от воздействия окружающей среды	*IP*...
11. Способ охлаждения	*IC*...
12. Исполнение по способу монтажа	*IM*...
13. Климатические условия	....
14. Класс нагревостойкости изоляции	*F*
15. Маркировка взрывозащиты	......

Введите данные, необходимые для теплового и вентиляционного расчетов асинхронного двигателя:

Из информационного окна № 2.19	
1. Высота оси вращения двигателя	h=... ?мм
2. Наружный диаметр магнитопровода статора	D_a=...? м
3. Внутренний диаметр магнитопровода статора	D =...?м
4. Расчетная длина воздушного зазора	l_δ= ...? м
5. Число пазов статора	Z_1=...?
6. Диаметр стандартного изолированиого провода	$d_{из}$=...? мм
7. Диаметр неизолированного провода (см. приложение 3)	d =...? мм
8. Однослойная толщина корпусной изоляции	$b_{из}$= ...? мм
Из информационного окна № 2.20	
9. Ширина верхней части паза статора	$b_{1(1)}$=...? мм
10. Ширина нижней части паза статора	$b_{2(1)}$=...? мм
11. Высота паза статора под укладку проводов	$h_{п.к\,(1)}$=...? мм
Из информационного окна № 5.11	
12. Вылет лобовых частей обмотки	$L_{выл}$ = ...? м
13. Длина лобовых частей катушки	$L_л$ = . ? м
14. Средняя длина витка катушки	$L_{ср}$ = ...? м
15. Активное сопротивление фазы статора при расчетной температуре	r_1 = ... ? Ом
16. Приведенное к статору активное сопротивление фазы ротора	r_2' = ...? Ом
Из информационного окна № 6.7	
17. Основные потери в стали	$\Delta p_{ст\,осн}$ =...? Вт
18. Механические и вентиляционные потери (если степень защиты IP23, то ввести $\Delta p_{мех}$=0)	$\Delta p_{мех}$ =...? Вт
Из информационного окна № 7.8	
19. Номинальный фазный ток статора	$I_{1н}$=...? А
20. Приведенный к статору номииальный ток ротора	$I_{2н}'$ = ...? А
21. Номинальная активная мощность на входе двигателя	$P_{1н}$=...? кВт
22. Номинальная активная мощность на валу	$P_{2н}$=...? кВт

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 9.1. Нет — формулы (9.1)–(9.3), информ. окно № 9.2?).

Электрические потери в обмотке статора при номинальном скольжении и температуре 115 °С, Вт:

$$\Delta p_{э1} = m_1 r_1 I_{1н}^2. \qquad (9.1)$$

Электрические потери в пазовой части обмотки статора при предельной температуре 140 °С (класс нагревостойкости изоляции *F*), Вт:

$$\Delta p'_{эп1} = k_р \Delta p_{э1} \frac{2l_\delta}{L_{ср}} = 1{,}07 \cdot \Delta p_{э1} \frac{2l_\delta}{L_{ср}}, \qquad (9.2)$$

где $k_р = 1{,}07$ — температурный коэффициент увеличения потерь.

Электрические потери в лобовых частях обмотки статора при предельной температуре 140 °С, Вт:

$$\Delta p'_{эл1} = k_р \Delta p_{э1} \frac{2L_л}{L_{ср}} = 1{,}07 \cdot \Delta p_{э1} \frac{2L_л}{L_{ср}}. \qquad (9.3)$$

Информационное окно № 9.2
Расчет превышения температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя

Введите значение коэффициента *K*, учитывающего, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки передается через станину в окружающую среду (табл. 9.1).

Таблица 9.1

Средние значения коэффициента *K*

Коэффициент	Исполнение двигателя по способу защиты	Число полюсов двигателя 2*p*					
		2	4	6	8	10	12
K	IP44, IP54	0,22	0,2	0,19	0,18	0,17	0,16
	IP23	0,84	0,8	0,78	0,76	0,74	0,72

Необходимая для принятия решения информация:

— число полюсов $2p$=...;

— степень защиты IP ....

K=...?

Введите числовое значение коэффициента теплоотдачи с поверхности α_1.

Необходимая для принятия решения информация:

— степень защиты IP=...;

— число полюсов $2p$ =...;

— высота оси вращения двигателя h = ... мм;

— наружный диаметр магнитопровода статора D_a=... м.

Коэффициент α_1 определить:

степень защиты IP44, IP54 h<160 мм — (рис. 9.1, *а*);

степень защиты IP44, IP54 h=160÷250 мм — (рис. 9.1, *б*);

степень защиты IP23, h=160÷250 мм — (рис. 9.2).

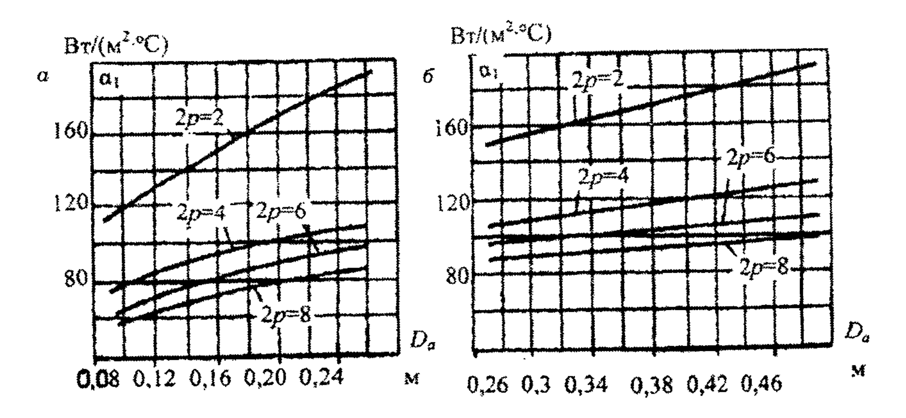


Рис. 9.1. Средние значения коэффициента теплоотдачи с поверхности α_1 для асинхронных двигателей исполнения IP44, IP54:
а – h < 160 мм; *б* – h = 160÷250 мм

α_1=…? Вт/(м^2°С)

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 9.2. Нет — формулы (9.4), (9.5) информ. окно № 9.3?).

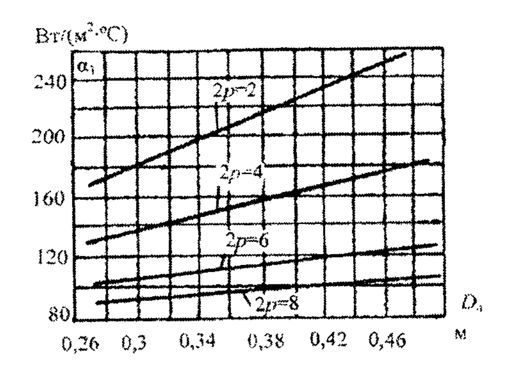


Рис. 9.2. Средние значеиия коэффициента теплоотдачи с поверхности α_1 для асинхронных двигателей исполнения IP23, h =160÷250 мм

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри машины, °С:

$$\Delta V_{\text{пов 1}} = K \frac{\Delta p'_{\text{эп.1}} + \Delta p_{\text{ст.осн.}}}{\pi D l_\delta \alpha_1}; \tag{9.4}$$

$$\Delta d = d / d_{\text{из}}. \tag{9.5}$$

Информационное окно № 9.3

Расчет среднего превышения температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины

Введите численное значение коэффициента теплопроводности внутренней изоляции катушки всыпной обмотки из эмалированных проводников $\lambda'_{\text{экв}}$ (рис. 9.3).

Необходимая для принятия решения информация:

$$\Delta d = \frac{d}{d_{из}} = \ldots$$

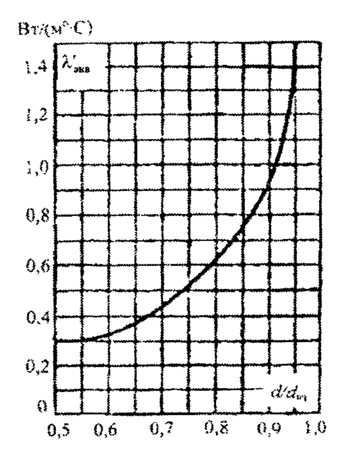


Рис. 9.3. Средние значения коэффициента теплопроводности $\lambda'_{экв}$ внутренней изоляции катушек всыпной обмотки из эмалированного провода

$\lambda'_{экв} = \ldots$, Вт/(м°·С)

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 9.3. Нет — формулы (9.6)—(9.10), информ. окно № 9.4?).

Расчетный периметр поперечного сечения паза статора, мм:

$$\Pi_{п1} = 2h_{п.к.(1)} + b_{1(1)} + b_{2(1)}. \tag{9.6}$$

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора, °С:

$$\Delta V_{из.п(1)} = \frac{\Delta p'_{эп.1}}{Z_1 l_\delta \Pi_{п1} \cdot 10^{-3}} \left(\frac{b_{из}}{\lambda_{экв}} + \frac{b_{1(1)} + b_{2(1)}}{16\lambda'_{экв}} \right) 10^{-3} = \frac{\Delta p'_{эп.1}}{Z_1 l_\delta \Pi_{п1} \cdot 10^{-3}} \left(\frac{b_{из}}{0,16} + \frac{b_{1(1)} + b_{2(1)}}{16\lambda'_{экв}} \right) 10^{-3}, \tag{9.7}$$

где $\lambda_{экв}$ =0,16 Вт/м·°С – средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции для классов нагревостойкости *B, F, H*.

Расчет перепада температуры по толщине изоляции лобовых частей обмотки статора,°С:

$$\Delta V_{из.л.(1)} = \frac{\Delta p'_{эл\,1}}{2Z_1 L_л \Pi_{п1}} \left(\frac{b_{из\,л\,1}}{\lambda_{экв}} + \frac{h_{п\,к\,(1)}}{12\lambda'_{экв.}} \right),$$

где $\Pi_{л1} \approx \Pi_{п1}$ – периметр условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки;

$b_{из.л(1)} = 0{,}5(d_{из} - d)$ односторонняя толщина изоляции лобовой части катушки всыпной обмотки (толщина змалевой изоляции провода).

В программе зта формула используется в следуюпцем виде,°С:

$$\Delta V_{из.л\,(1)} = \frac{\Delta p'_{эл.1}}{2Z_1 L_л \Pi_{п1} \cdot 10^{-3}} \left(\frac{0{,}5(d_{из} - d)}{0{,}16} + \frac{h_{п\,к.(1)}}{12\lambda'_{экв.}} \right) \cdot 10^{-3}. \qquad (9.8)$$

Расчет превышения температуры наружной поверхности изоляции лобовых частей обмотки статора над температурой воздуха внутри машины, °С:

$$\Delta V_{пов.л\,1} = \frac{K \Delta p'_{эл}}{2\pi D L_{выл} \alpha_1}. \qquad (9.9)$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины, °С:

$$\Delta V'_1 = \frac{(\Delta V_{пов.1} + \Delta V_{из.п.1})2l_\delta + (\Delta V_{из.л.1} + \Delta V_{пов.л.1})2L_л}{L_{ср}}. \qquad (9.10)$$

Информационное окно № 9.4
Расчет среднего превышения температуры обмотки статора над температурой окружающей среды

Введите значение коэффициента подогрева воздуха, $\alpha_в$.

Необходимая для принятия решения информация:

— число полюсов $2p = \dots$;

— степень защиты IP ....;

— высота оси вращения двигателя $h = \dots$ мм;

— наружный диаметр магнитопровода статора $D_a = \dots$ м.

Коэффициент $\alpha_в$ определить:

степень защиты IP44, IP54 $h < 160$ мм — (рис. 9.4, *а*);

степень защиты IP44, IP54 $h = 160 \div 250$ мм — (рис. 9.4, *б*);

степень защиты IP23, $h = 160 \div 250$ мм — (рис. 9.5).

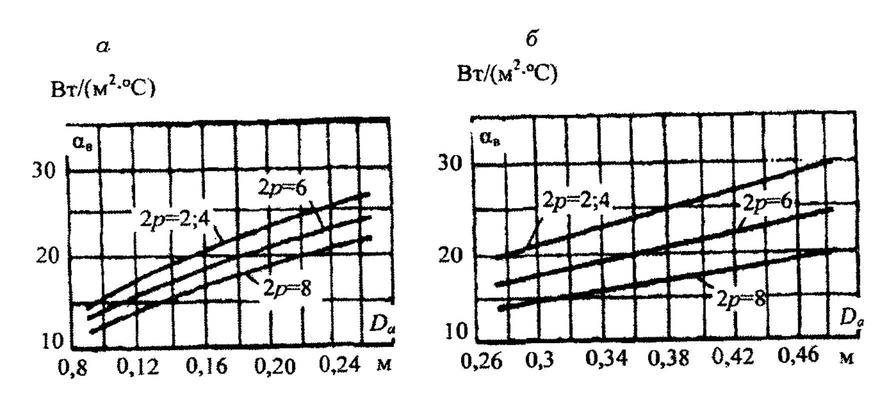


Рис. 9.4. Средние значения коэффициента подогрева воздуха $\alpha_в$ для асинхронных двигателей исполнения IP44, IP54:
а — $h < 160$ мм; *б* — $h = 160 \div 250$ мм

$\alpha_в = \dots ?$, Вт/(м^2°С)

Введите значение периметра поперечного сечения ребер корпуса асинхронного двигателя.

Необходимая для принятия решения информация:

— высота оси вращения h=... мм;

— степень защиты IP....

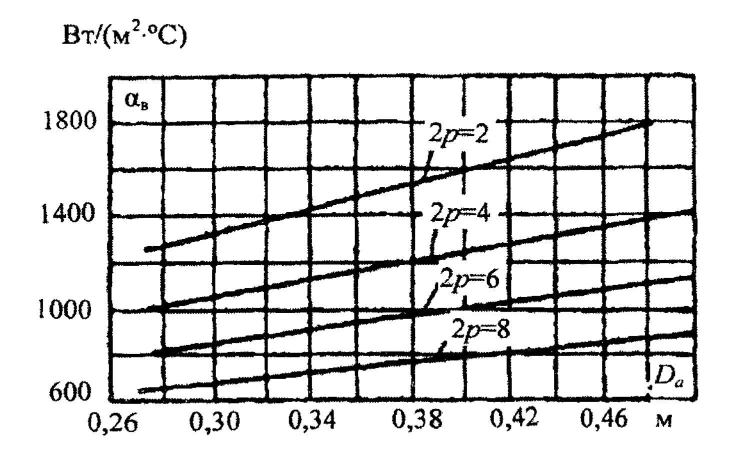


Рис. 9.5. Средние значения коэффициента подогрева воздуха $\alpha_в$ для асинхронных двигателей исполнения IP23, h = 160÷250мм

Периметр поперечного сечения ребер корпуса двигателя определить:

— степень защиты IP44, IP54 — (рис. 9.6);

— степень защиты IP23 — ввести $П_р$=0 (в двигателях со степенью защиты IP23 продольных ребер охлаждения нет).

$П_р$=...? м

Корректировка расчета: (Да — информ. окно № 9.4. Нет — формулы (9.11)—(9.20), информ. окно № 9.5?).

Электрические потери в роторе в номинальном режиме и расчетной температуре 115 °С, Вт:

$$\Delta p_{э2} = m_1 r_2' (I_{2н}')^2 . \qquad (9.11)$$

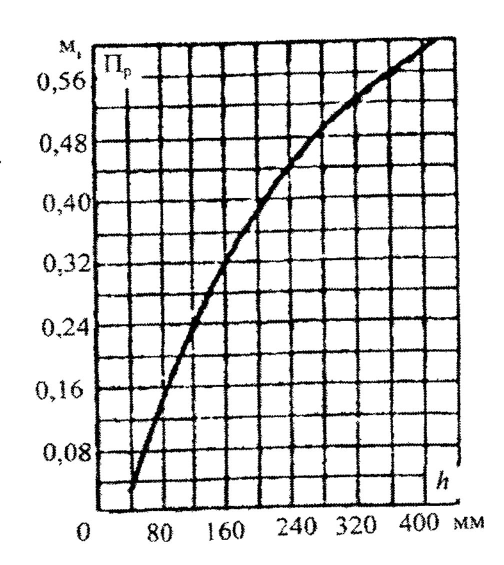


Рис. 9.6. Средние значения периметра поперечного сечения ребер асинхронных двигателей, степени защиты IP44, IP54

Сумма потерь в двигателе в номинальном режиме при расчетной температуре 115 °С, Вт:

$$\sum \Delta p = (P_{1н} - P_{2н}) \cdot 10^3 . \qquad (9.12)$$

Сумма потерь в двигателе в номинальном режиме и расчетной температуре 140 °С, Вт:

$$\sum \Delta p' = \sum \Delta p + (k_р - 1)(\Delta p_{э1} + \Delta p_{э2}) = \sum \Delta p + 0{,}07(\Delta p_{э1} + \Delta p_{э2}) . \qquad (9.13)$$

Эквивалентная поверхность охлаждения корпуса двигателя, м^2:

$$S_{кор} = (\pi D_a + 8\Pi_р)(l_\delta + 2L_{выл}) . \qquad (9.14)$$

Сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя, Вт:

$$\sum \Delta p'_{в} = \sum \Delta p' - (1 - K) \cdot (\Delta p'_{эп\,1} + \Delta p_{ст\,осн}) - 0{,}9\Delta p_{мех}. \qquad (9.15)$$

Для двигателей со степенью защиты IP44 при расчете $\sum \Delta p'_{в}$ не учитывают мощность, потребляемую наружным вентилятором, которая составляет примерно 0,9 суммы полных механических потерь (см. формулу (9.15)).

Для двигателей со степенью защиты IP23 механические потери принимают равными нулю ($\Delta p_{мех}=0$), так как в этих двигателях иет наружного вентилятора.

Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды, °С:

$$\Delta V_{в} = \frac{\sum \Delta p'_{в}}{S_{кор}\,\alpha_{в}}. \qquad (9.16)$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды, °С:

$$\Delta V_1 = \Delta V'_1 + \Delta V_{в}. \qquad (9.17)$$

В связи с приближенным характером расчета среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды должно быть, по крайней мере, на 10—20 % меньше, чем максимально допустимое превышение температуры для принятого класса нагревостойкости изоляции.

Согласно действующему стандарту предельно допустимое превышение температуры для обмоток машин переменного тока с изоляционными материалами класса негревостойкости F равно 100 °С.

$$\Delta V = 100^0 - \Delta V_1. \qquad (9.18)$$

При правильном расчете $\Delta V > 0$.

$$\Delta V\% = \frac{(100^0 - \Delta V_1) \cdot 100}{\Delta V_1}. \qquad (9.19)$$

При правильном расчете $\Delta V\% \geqslant 10\ \%$.

Скорость вращения магнитного поля, об/мин:

$$n = \frac{60 f_{1н}}{p} = \frac{120 f_{1н}}{2p}. \tag{9.20}$$

Информационное окно № 9.5
Вентиляционный расчет

Введите степень защиты рассчитываемого двигателя

Степень защиты IP23 – Да? (информационное окно № 9.6), (формулы (9.21)–(9.23))

Степень защиты IP44 – Да? (информационное окно № 9.7), (формулы (9.24)–(9.27))

Информационное окно № 9.6
Вентиляционный расчет асинхронного двигателя со степенью защиты IP23

Введите значение коэффициента m.

Необходимая для принятия решения информация:

— число полюсов магнитного поля $2p = \ldots$;

— коэффнциент $m = 2{,}6$, если $2p = 2$;

— коэффициент $m = 3{,}15$, если $2p \geqslant 4$.

$m = \ldots ?$

Корректировка расчета (Да — информ. окно № 9.6. Нет — формулы (9.21)–(9.23), информ. окно № 9.8?).

Требуемый для охлаждения двигателя расход воздуха, м^3/с:

$$Q_{в\,23} = \frac{\sum \Delta p'_в}{1100\Delta V'_в} = \frac{\sum \Delta p'_в}{2200\Delta V_в}, \qquad (9.21)$$

где $\Delta V'_в \approx 2\Delta V_в$ — превышение температуры выходящего из двигателя воздуха над температурой входящего воздуха.

Расход воздуха, который может быть получен при данных размерах двигателя, м^3/с:

$$Q'_{в\,23} = 0{,}1m\frac{n}{100}D_a^2. \qquad (9.22)$$

Если расход воздуха, который может быть получен при данных размерах двигателя больше, чем требуемый для охлаждения двигателя расход воздуха, то расчет выполнен правильно ($\Delta Q_{23} \geqslant 0$).

$$\Delta Q_{23} = (Q'_{в.23} - Q_{в.23}). \qquad (9.23)$$

Информационное окно № 9.7
Вентиляционный расчет асинхронного двигателя со степенью защиты IP44, IP54

Введите значение коэффициента m' (табл. 9.2).

Необходимая для принятия решения информация:

— число полюсов $2p = \ldots$;

— высота оси вращения двигателя $h = \ldots$ мм.

Таблица 9.2

Численное значение коэффициента m'

$2p$	$2p = 2$		$2p \geqslant 4$	
h, мм	$h \leqslant 132$	$h \geqslant 160$	$h \leqslant 132$	$h \geqslant 160$
m'	2,6	3,3	1,8	2,5

$m' = \ldots ?$

Корректировка расчета: (Да — информ. окно № 9.7. Нет — формулы (9.24)—(9.27), информ. окно № 9.8?).

Коэффициент, учитывающий изменение условий охлаждения по длине поверхности корпуса, обдуваемого наружным вентилятором

$$K_m = m'\sqrt{\frac{n}{100}D_a}\,. \tag{9.24}$$

Требуемый для охлаждения двигателя расход воздуха, м³/с:

$$Q_{в.44} = \frac{K_m \sum \Delta p'_в}{1100\Delta V_в}\,. \tag{9.25}$$

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором двигателя, м³/с:

$$Q'_{в.44} = 0{,}6D_a^3\,\frac{n}{100}\,. \tag{9.26}$$

Если расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором двигателя, больше, чем требуемый для охлаждения двигателя расход воздуха, то расчет выполнен правильно ($\Delta Q_{44} \geqslant 0$):

$$\Delta Q_{44} = (Q'_{в44} - Q_{в.44})\,. \tag{9.27}$$

Информационное окно № 9.8
Тепловой и вентиляционный расчеты асинхронного двигателя закончены. Проверка введенных данных

Число, месяц, год	…
Ваши фамилия, инициалы	…
Группа	…
Руководитель, должность, звание, фамилия, инициалы	…

Данные технического задания на проектирование асинхронного двигателя:

1. Тип двигателя	Асинхронный с короткозамкнутым ротором, обмотка ротора «беличья клетка» (заливка алюминием)
2. Назначение	Общего исполнения или взрывозащищенный
3. Номинальный режим работы	$S1$
4. Номинальная мощность	$P_{2н}$=... кВт
5. Номинальное напряжение	Y/Δ,... В
6. Число полюсов	$2p$ = ...
7. Базисная частота	$f_{1н}$=... Гц
8. Частоты сети, при которых рассчитываются рабочне характеристики двигателя	f_1=... Гц
9. Закон изменения напряжения или ЭДС статора в зависимости от частоты	$U_1/U_{1н}$=... $E_1/E_{1н}$=...
10. Степень защиты от воздействия окружающей среды	*IP...*
11. Способ охлаждения	*IC...*
12. Исполнение по способу монтажа	*IM...*
13. Климатические условия	....
14. Класс нагревостойкости изоляции	*F*
15. Маркировка взрывозащиты	......

Данные, введенные в процессе расчета:

Из информационного окна № 2.19	
1. Высота оси вращения двигателя	h=... мм
2. Наружный диаметр магнитопровода статора	D_a=... м
3. Внутренний диаметр магнитопровода статора	D =...м
4. Расчетная длина воздушного зазора	l_δ= ... м
5. Число пазов статора	Z_1=...
6. Диаметр стандартного изолированного провода	$d_{из}$=... мм
7. Диаметр неизолированного провода (см. приложение 3)	d =...мм
8. Однослойная толщина корпусной изоляции	$b_{из}$= ... мм

Из информационного окна № 2.20	
9. Ширина верхней части паза статора	$b_{1(1)}$=... мм
10. Ширина нижней части паза статора	$b_{2(1)}$=... мм
11. Высота паза статора под укладку проводов	$h_{п.к.(1)}$=... мм
Из информационного окна № 5.11	
12. Вылет лобовых частей обмотки	$L_{выл}$ = ... м
13. Длина лобовых частей катушки	$L_{л}$ = ... м
14. Средняя длина витка катушки	$L_{ср}$ = ... м
15. Активное сопротивление фазы статора при расчетной температуре	r_1 = ... Ом
16. Приведенное к статору активное сопротивление фазы ротора	r_2' = ... Ом
Из информационного окна № 6.7	
17. Основные потери в стали	$\Delta p_{ст.осн}$ =... Вт
18. Механические и вентиляционные потери (Если степень защиты IP23, то ввести $\Delta p_{мех}$=0)	$\Delta p_{мех}$ =... Вт
Из информационного окна № 7.8	
19. Номинальный фазный ток статора	$I_{1н}$=... А
20. Приведенный к статору номинальный ток ротора	$I_{2н}'$ = ...А
21. Номинальная активная мощность на входе двигателя	$P_{1н}$=... кВт
22. Номинальная активная мощность на валу	$P_{2н}$=... кВт
23. Коэффициент К	К...
24. Коэффициент теплоотдачи с поверхности	α_1=...Вт/(м^2·°С)
25. Коэффициент теплопроводности	$\lambda'_{экв}$ = ... Вт/(м^2·°С)
26. Коэффициент подогрева воздуха	$\alpha_в$=...Вт/(м^2·°С)
27. Значение периметра поперечного сечения ребер двигателя	$П_р$=...м
28. Коэффициент *m* (степень защиты IP23)	*m* =...
29. Коэффициент *m'* (степень защиты IP44)	*m'*=...

Просмотр введенных данных закончен.

Повторить: (Да — информ. окно № 9.8?).

Результаты расчета: (Да — информ. окно № 9.9?).

Информационное окно № 9.9
Результаты теплового и вентиляционного расчетов асинхронного двигателя

$\Delta p_{э1}=\ldots$ Вт (9.1)

$\Delta p'_{эп1}=\ldots$ Вт (9.2)

$\Delta p'_{эл1}=\ldots$ Вт (9.3)

$\Delta V_{пов\,1}=\ldots$°C (9.4)

$\Delta d=\ldots$ (9.5)

$\Pi_{п1}=\ldots$мм (9.6)

$\Delta V_{из\,п.1}=\ldots$ °C (9.7)

$\Delta V_{из.л..1}=\ldots$ °C (9.8)

$\Delta V_{пов\,л\,1}=\ldots$ °C (9.9)

$\Delta V'_1=\ldots$ °C (9.10)

$\Delta p_{э2}=\ldots$ Вт (9.11)

$\sum \Delta p=\ldots$ Вт (9.12)

$\sum \Delta p'=\ldots$ Вт (9.13)

$S_{кор}=\ldots$ м^2 (9.14)

$\sum \Delta p'_в=\ldots$ Вт (9.15)

$\Delta V_в=\ldots$ °C (9.16)

$\Delta V_1=\ldots$ °C (9.17)

$\Delta V=\ldots$ °C ($\Delta V>0$) (9.18)

$\Delta V\%=\ldots\%$ ($\Delta V\%\geq 10\%$)(9.19)

$n=\ldots$об/мин (9.20)

$Q_{в\,23}=\ldots$ м^3/с (9.21)

$Q'_{в.23}=\ldots$ м^3/с (9.22)

$\Delta Q_{23}=\ldots$ м^3/с (9.23)

($\Delta Q_{.23}>0$)

$K_m=\ldots$ (9.24)

$Q_{в\,44}=\ldots$ м^3/с (9.25)

$Q'_{в.44}=\ldots$ м^3/с (9.26)

$\Delta Q_{44}=\ldots$ м^3/с (9.27)

($\Delta Q_{44}>0$)

Просмотр результатов расчета закончен.

Повторить: (информ. окно № 9.9?).

Печать: (информ. окно № 9.8 и № 9.9?)

10. КОНСТРУИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Графическая часть проекта включает: продольный и поперечный разрезы рассчитанного двигателя; паз и зубец статора, паз и зубец ротора, катушку обмотки статора, если обмотка двухслойная, или катушечную группу, если обмотка однослойная; спецификацию основных частей двигателя, спецификацию корпусной изоляции обмотки статора и выполняется на одном листе формата 841 x 594 мм в соответствии с правилами Единой системы конструкторской документации (ЕСКД).

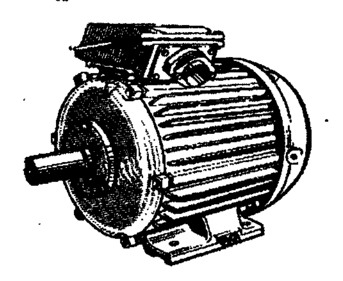
Рекомендуют общие виды двигателей (продольный и поперечный разрезы), в зависимости от высоты оси вращения, изображать в масштабе: 1:1; 1:2; 1:2,5. Зубцовые зоны статора и ротора чертить в масштабе: 2:1; 2,5:1; 4:1 или 5:1.

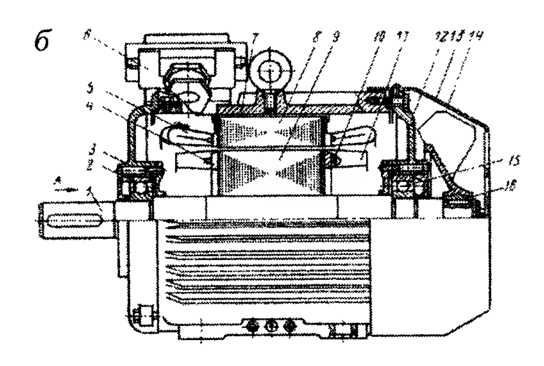
Общие виды асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором со степенями защиты IP44(54) и IP23 показаны на рис. 10.1 и 10.2.

Прежде чем приступить к чертежу асинхронного двигателя, надо выбрать размеры выступающего конца вала и подшипники. Размеры выступающего конца вала регламентируются стандартом, поэтому они выбираются по рассчитанному значению максимального момента асинхронного двигателя. Максимальный момент двигателя должен быть несколько меньше наибольшего допускаемого момента вращения, связанного с диаметром выступающего цилиндрического конца вала.

Длина выступающего конца вала, размеры призматической шпонки и шпоночного паза, а также наибольший допускаемый момент вращения М, связанные с диаметром выступающего цилиндрического конца вала, приведены в табл. 10.1.

а





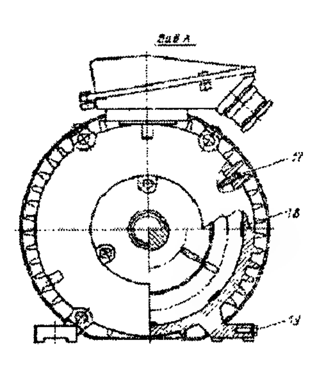
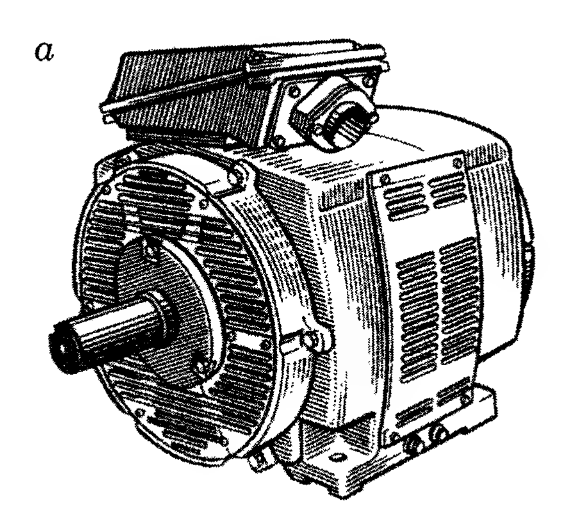


Рис. 10.1. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP44 (54), h = 160 мм, исполнения IM1001:
а — общий вид; *б* — продольный и поперечный разрезы:
1 — вал; *2, 15* — подшипники; *3, 12* — подшипниковые щиты;
4 — короткозамыкающие кольца ротора; *5* — лобовые части обмотки статора;
6 — коробка выводов; 7 — корпус; *8* — сердечник статора; *9* — сердечник ротора; *10* — балансировочные грузы; *11* — вентиляционные лопатки ротора;
13 — кожух вентилятора; *14* — вентилятор; *16* — втулка вентилятора;
17 — стопорные винты; *18* — скобы крепления сердечника статора;
19 — болты заземления



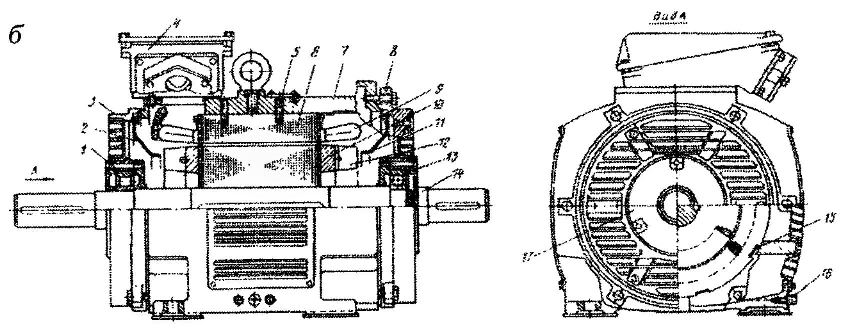


Рис. 10.2. Двигатель с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP 23: *а* — общий вид; *б* — продольный и поперечные разрезы: *1*, *13* — подшипники; *2*, *11* — диффузоры; *3*, *8* — подшипниковые щиты; *4* — коробка выводов; *5* — стопорный винт; *6* — сердечник статора; *7* — корпус; *9* — лобовые части обмотки статора; *10* — короткозамыкающее кольцо обмотки ротора; *12* — вентиляционные лопатки; *14* — вал; *15* — скобы креплеиия сердечника статора; *16* — болт заземлеиия; *17* — подшипниковая крышка

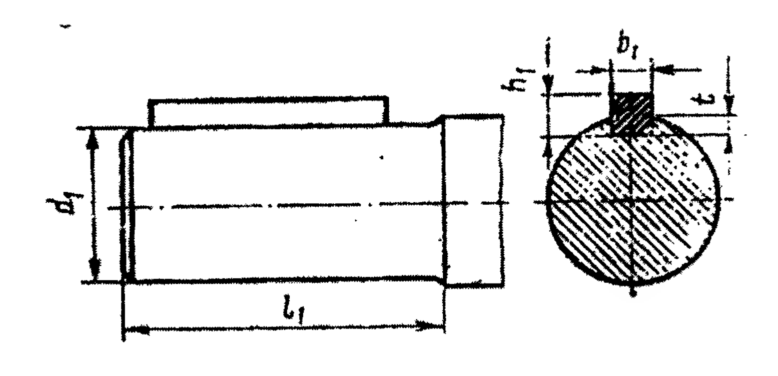


Рис. к табл. 10.1

Таблица 10.1

Размеры выступающего конца вала

d_1	l_1	b_1	h_1	t	M, Н·м	d_1	l_1	b_1	h_1	t	M, Н·м
мм						мм					
7	16	2	2	1,2	0,25	55	110	16	10	6	355
9	20	3	3	1,8	0,63	60	140	18	11	7	450
11	23	4	4	2,5	1,25	65	140	18	11	7	630
14	30	5	5	3	2,8	70	140	20	12	7,5	800
16	40	5	5	3	4,5	75	140	20	12	7,5	1000
18	40	6	6	3,5	7,1	80	170	22	14	9	1250
19	40	6	6	3,5	8,25	85	170	22	14	9	1600
22	50	6	6	3,5	14	90	170	25	14	9	1900
24	50	8	7	4	18	95	170	25	14	9	2360
28	60	8	7	4	31,5	100	210	28	16	10	2800
32	80	10	8	5	50	110	210	28	16	10	4000
38	80	10	8	5	90	120	210	32	18	11	5300
42	110	12	8	5	125	130	250	32	18	11	7400
48	110	14	9	5,5	200						

Значение вала под подшипник d_2 лежит в диапазоне $d_1<d_2<D_в$, где d_1— диаметр выступающего конца вала, $D_в= D_j$ — диаметр вала, на который напрессован сердечник ротора. В двигателях с высотой оси вра-

щения $h \leqslant 250$ мм сердечник ротора прессуется непосредственно на гладкий вал без шпонки.

Диаметр вала под подшипник d_2 и диаметр вала за подшипником d_3 принимают в зависимости от выбранного наружного диаметра выступающего конца вала d_1 согласно данным табл. 10.2.

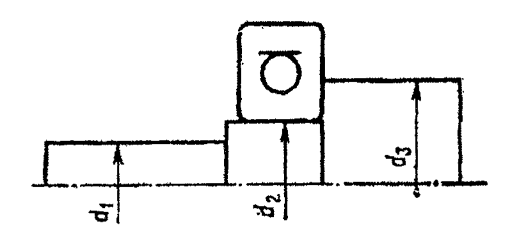


Рис. к табл. 10.2

Таблица 10.2

Диаметры вала под подшипник и за подшипником

d_1	d_2	d_3	d_1	d_2	d_3	d_1	d_2	d_3
7	8	12	32	35	44	75	80	92
9	10	15	38	40	49	80	85	99
11	12	17	42	45	54	85	90	104
14	15	20	48	50	60	90	95	109
16	17	22	55	60	72	95	100	114
19	20	26	60	65	77	100	105	119
24	25	32	65	70	82	110	120	134
28	30	37	70	75	87	120	138	148

По диаметру вала под подшипник (d_2) выбираются подшипники (приложение 4).

В машинах с $h \leqslant 160 \div 200$ мм оба подшипника шариковые радиальные однорядные по ГОСТ 8338; при этом с одной стороны машины между подшипниковой крышкой и подшипником оставляют зазор,

который обеспечивает возможность аксиального перемещения вала, компенсирующего неточности осевых размеров при сборке машины.

Для компенсации указанных отклонений могут также применяться с обеих сторон машины пружинящие стальные гофрированные шайбы.

В машинах с $h \geqslant 200$ мм со стороны выступающего конца вала располагают роликовый радиальный подшипник с короткими цилиндрическими роликами по ГОСТ 8328; при этом отпадает надобность в зазоре или в пружинящих шайбах, так как роликовый подшипник обеспечивает возможность аксиального перемещения вала.

Радиальные подшипники могут воспринимать как радиальную, так и осевую нагрузку, не превышающую 70 % неиспользованной радиальной нагрузки. При соблюдении этого условия машины с шарикоподшипниками могут работать как с горизонтальным, так и вертикальным расположением вала.

В машинах, предназначенных для тяжелых режимов работы, применяют сдвоенные радиально-упорные шариковые подшипники по ГОСТ 832, которые воспринимают на себя нагрузку от силы тяжести ротора и осевую составляющую нагрузки от передачи момента.

При высотах оси вращения 45—112 мм применяют шариковые подшипники легкой серии с двухсторонним уплотнением и постоянно заложенной смазкой, рассчитанной на весь срок службы подшипника.

В двигателях $h > 112$ мм обычно применяют со стороны рабочего конца вала подшипник средней серии, а с противоположной — легкой.

После выбора подшипников заполняется таблица 10.3.

Конструктивная компоновка двигателя со степенями защиты IP44 (54) и IP23 начинается с вычерчивания активной части машины (общего вида с продольным разрезом) по размерам, полученным в результате расчета (таблица 10.4).

При выполнении чертежа все геометрические размеры надо приводить в мм. Сначала изображается центральная часть вала ($D_в=D_j$) и сердечники ротора и статора.

Таблица 10.3

Размеры выбранных подшипников

Диаметр выступающего конца вала d_1, мм	Подшипник со стороны рабочего конца вала				Подшипник со стороны вентилятора			
	Условное обозначение N	Вн. диаметр d, мм	Нар. диаметр D, мм	Ширина B, мм	Условное обозначение N	Вн. диаметр d, мм	Нар. диаметр D, мм	Ширина B, мм

Таблица 10.4

Геометрические размеры сердечникон статора и ротора

Высота оси вращения h, мм	Длина воздушного зазора, l_δ, мм	Сердечник ротора		Сердечник статора	
		D_j, мм	D_2, мм	D_a, мм	D, мм

Затем показываются вылеты лобовых частей обмотки статора ($L_л$, $h_{п\,к\,(l)}$), замыкающие кольца ($h_{кл}$, $b_{кл}$) и вентиляционные лопатки ($l_{вл}$, $h_{вл}$) ротора (таблица 10.5).

Таблица 10.5.

Размеры лобовых частей обмоток и вентиляционных лопаток

$L_л$, мм	$h_{п.к\,(l)}$, мм	$h_{кл}$, мм	$b_{кл}$, мм	$l_{вл}$, мм	$h_{вл}$, мм

При выполнении сборочного чертежа необходимо помнить, что в двигателях с высотами оси вращения $h \leqslant 250$ мм и длииой воздушного зазора $l_\delta \leqslant 300$ мм в магнитопроводах статора и ротора аксиальных и радиальных каналов не делают, поэтому сердечники статора и ротора набираются каждый в один пакет.

После заливки алюминием готовый ротор двигателей с $h \leqslant 250$ мм насаживают на вал без шпонки, в нагретом состоянии.

Сердечник статора двигателей с $h \leqslant 250$ мм набирают на центрирующую оправку вне станины из отштампованных листов электротехнической стали, спрессовывают и крепят стальными скобами, расположенными в канавках по наружной поверхности сердечника. Обмотанный и пропитанный сердечник статора впрессовывают в станину и закрепляют в ней стопорными винтами.

После того как начерчена активная часть двигателя, выбирается форма станины (корпуса) двигателя, которая зависит от степени защиты машины.

В связи с тем, что для двигателей с высотами оси вращения $h \leqslant 250$ мм и степенями защиты IP44(54) и IP23 подшипниковые щиты выпускаются с внутренними замковыми поверхностями, станины этих двигателей выполняются с наружными замковыми поверхностями.

Наружные замковые поверхности — это кольцевые цилиндрические заточки наружиых сторон торцов станины, обеспечивающие посадку и центрирование подшипниковых щитов. Для крепления подшипниковых щитов в станине предусматривают приливы или ушки с нарезанными отверстиями для болтов.

Станины машин со способом монтажа IM1001 имеют опорные лапы, отливаемые заодно с чугунной станиной. В станинах асинхронных двигателей из алюмнниевых сплавов лапы отливают отдельно, а затем крепят к статору.

Для размещения коробки выводов в станине предусматривают прилитые фланцевые основания с окнами для выводных проводов обмотки. Удобным в эксплуатации является расположение коробки выводов сверху станины, так как при повороте коробки подводимый кабель может присоединяться с разных сторон машины.

Для обеспечения требований по технике безопасности на станине размещают наружные зажимы для заземления корпуса машины. Зажимы снабжают устройством от самоотвинчивания и крепят около опорных лап и в коробке выводов.

Станины протачивают по внутреннему диаметру под посадку отдельно изготовленных сердечников.

На станине в верхней части предусмотрены рым-болты или транспотные ушки, предназначенные для подъема машины. Машины массой менее 30 кг не имеют специальных устройств для подъема. К станине на видном месте крепят табличку из некоррозийных материалов с техническими данными машины.

Наряду с вышеперечисленными общими конструктивными решениями, станины асинхронных двигателей со степенями защиты IP44(54) и IP23 имеют конструктивные различия.

Станины двигателей со степенью защиты IP44, IP54

Станины асинхронных двигателей с высотами оси вращения 56—112 мм выполняются из высокопрочного алюминиевого сплава, с продольно-поперечным оребрением, с прилитым корпусом вводного устройства, с лапами (рис. 10.3, *а*) или без лап. При продольно-поперечном оребрении подшипниковые щиты отливаются также с ребрами охлаждения на наружиой поверхности.

Для асинхронных двигателей с высотами вращения 132—250 мм приняты станины из чугуна с радиальными ребрами (рис. 10.3, *б*).

Станины АД с высотамн оси вращения 132—180 мм могут отливаться также из алюминиевого сплава.

Внутренняя поверхность станииы со степенью защиты IP44 (54) и высотой оси вращения $h \leqslant 400$ мм гладкая, обработана для посадки (запрессовки) магнитопровода статора.

Проведенные исследования показали, что продольно-поперечное оребрение позволяет на 10—12 % снизить массу станины по сравнению с радиальным оребрением при одной и той же поверхности охлаждения.

Количество ребер на наружной поверхности станины и высоту ребра можно рассчитать по формулам (10.1) и (10.2).

Количество ребер

$$n_р \approx 6{,}4\sqrt[3]{h}. \qquad (10.1)$$

Высота ребер

$$h_р \approx 0,6\sqrt[4]{h^3}, \tag{10.2}$$

где h—высота оси вращения.

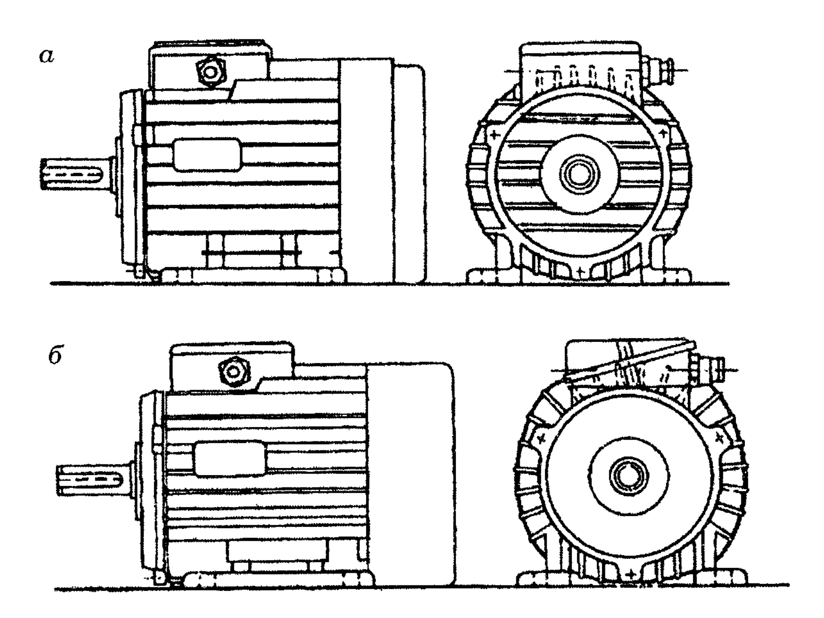


Рис. 10.3. Двигатель со степенью защиты IP44, IP54
с продольно-поперечным (*а*) и радиальным оребрением (*б*)

Полученные результаты $n_р$ и $h_р$ округляют до целых чисел. В курсовом проекте рассчитывается АД со способом монтажа IM 1001, поэтому ниже рассматривается такая конструкция двигателя.

Наружный диаметр станины (корпуса) при степени защиты IP44, IP54 (рис. 10.4)

$$D_{корп} = D_a + 2h_2, \tag{10.3}$$

где h_2 — толщина стенки станины (рис. 10.5).

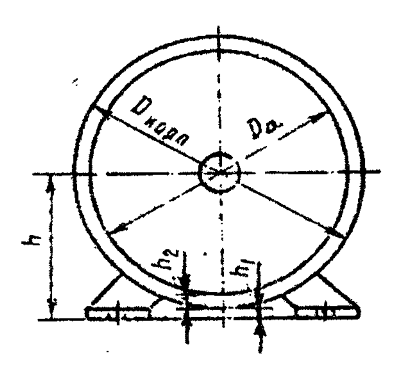


Рис. 10.4. К определению $D_{корп}$ машин переменного тока с шихтованным сердечником статора

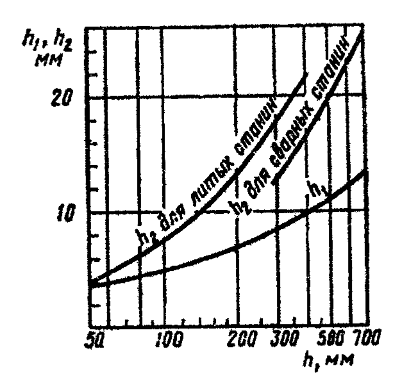


Рис. 10.5. Значения h_1 и $h_2 = f(h)$

Наружный диаметр станины *D*корп должен быть меньше или равен максимально возможному диаметру D_{max}.

$$D_{max} = 2(h + h_1), \tag{10.4}$$

$$D_{корп} \leqslant D_{max},$$

где h_1 – минимально допустимое расстояние между станиной и опорной плоскостью (см. рис. 10.4 и 10.5).

Все выбранные размеры станины вносят в таблицу 10.6.

Таблица 10.6

Размеры станины асинхронного двигателя со степенью защиты IP44 (54)

Высота оси вращения	Наружный диаметр станины	Внутр. диаметр станины	Толщина стенки станины	Расстояние между станиной и опорной плоскостью	Количество ребер	Высота ребер	Длина станины
h, мм	$D_{корп}$, мм	D_a, мм	h_2, мм	h_1, мм	$n_р$, шт	$h_р$, мм	$L_{корп}$, мм

Длина станины $L_{корп}$ определяется по продольному разрезу сборочного чертежа двигателя, после того как будут начерчены подшипниковые щиты. Зазоры между вылетами лобовых частей обмотки статора (концами вентиляционных лопаток ротора) и внутренней поверхностью подшипниковых щитов не должны превышать 15—20 мм.

Станины двигателей со степенью защиты IP23

Для асинхронных двигателей со степенью защиты IP23 принята двухсторонняя радиальная симметричная система вентиляции; способ охлаждения IC01. Станины АД со степенью защиты IP23 и высотой оси вращения $h \leqslant 250$ мм отливают из чугуна с гладкой внешней поверхностью и с шестью продольными (аксиальными) ребрами на внутренней поверхности, которые протачивают под посадку (запрессовку) магнитопровода статора. По бокам в нижней части станины предусматривают отверстия для выхода охлаждающего воздуха. Отверстия закрывают жалюзи, которые штампуют из стали или выплавляют из алюминиевых сплавов. Боковые жалюзи могут отливаться вместе со станиной.

Аксиальные ребра станины посредине магнитопровода имеют разрыв 50—80 мм, что устраняет воздушные мешки, которые ухудшают теплоотдачу с поверхности сердечника.

Форма станины — четырехгранная с дугообразно закругленными гранями. Эта форма соответствует тенденции перехода от круглой формы к прямоугольной; она лучше вписывается в интерьер производственных помещений. Входные отверстия для воздуха расположены на торцах подшипниковых щитов, причем их форма способствует равномерному распределению воздушного потока и направлению его внутрь АД. Степень защиты IP23 обеспечивается жалюзи, отлитыми вместе с подшипниковым щитом. Это конструктивное решение придает стабильность и надежность как щиту, так и решетке.

Жалюзи для выхода воздуха расположены на боковых поверхностях станины.

На внутренней поверхности подшипниковых щитов закреплены воздухонаправляющие диффузоры.

Сердечник статора крепят на аксиальных ребрах станины, причем его центр смещен вниз относительно центра станины, в результате чего поперечное сечение вентиляционных каналов в верхней части АД больше сечения каналов в нижней части.

Для того чтобы приступить к разработке конструкции станины АД со степенью защиты IP23, необходимо кроме высоты оси вращения h знать условную длину станины.

Шкала электрических машин исполнения IM1001, IM1081 построена таким образом, что на каждой высоте оси вращения могут выполняться машины, отличающиеся длиной станины. Длинам станин присвоены условные обозначения: S (Short) — короткая, M (Medium) — средняя и L (Long) — длинная. При этом каждому значению высоты оси вращения h и условному обозначению длины станины соответствуют определенные установочные размеры. Ориентировочио условную длину станины можно принять по значению критерия правильности выбора главных размеров λ (формула 1.7). Если расчетное значение критерия λ лежит в нижней части оптимальной зоны (см. рис. 1.7), то условная длина станиины S, если в средней — M, а если в верхней — L. По известным данным (h, $2p$ и условной длине станины) по таблице 10.7 определяют габаритные размеры двигателя b_{30} и h_{31}.

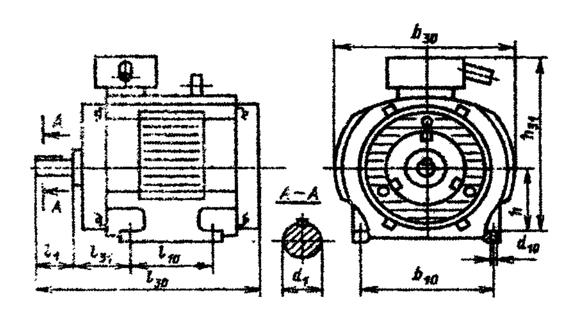


Рис. к табл. 10.7

Таблица 10.7

Габаритные, установочные н присоединительные размеры двигателей: исполнеиие IM 1001, степень защиты IP23 (h=160÷250 мм)

<table>
<tr><th rowspan="2">h, мм</th><th rowspan="2">Число полюсов</th><th rowspan="2">Условная длиіна станины</th><th colspan="2">Габаритные размеры, мм</th><th colspan="4">Установочиые и присоедини-тельные размеры,мм</th></tr>
<tr><th>h_{31}</th><th>b_{30}</th><th>l_{10}</th><th>l_{31}</th><th>d_{10}</th><th>b_{10}</th></tr>
<tr><td rowspan="2">160</td><td>2</td><td rowspan="2">S</td><td rowspan="4">430</td><td rowspan="4">332</td><td rowspan="2">178</td><td rowspan="4">108</td><td rowspan="8">15</td><td rowspan="4">254</td></tr>
<tr><td>4</td></tr>
<tr><td rowspan="2">160</td><td>2</td><td rowspan="2">M</td><td rowspan="2">210</td></tr>
<tr><td>4</td></tr>
<tr><td rowspan="2">180</td><td>2</td><td rowspan="2">S</td><td rowspan="4">470</td><td rowspan="4">385</td><td rowspan="2">203</td><td rowspan="4">121</td><td rowspan="4">279</td></tr>
<tr><td>4,6,8</td></tr>
<tr><td rowspan="2">180</td><td>2</td><td rowspan="2">M</td><td rowspan="2">241</td></tr>
<tr><td>4,6,8</td></tr>
<tr><td rowspan="2">200</td><td>2</td><td>M</td><td rowspan="4">535</td><td rowspan="4">460</td><td rowspan="2">267</td><td rowspan="4">133</td><td rowspan="6">19</td><td rowspan="4">318</td></tr>
<tr><td>4,6,8</td><td>M</td></tr>
<tr><td rowspan="2">200</td><td>2</td><td>L</td><td rowspan="2">305</td></tr>
<tr><td>4,6,8</td><td>L</td></tr>
<tr><td rowspan="2">225</td><td>2</td><td>M</td><td rowspan="2">580</td><td rowspan="2">500</td><td rowspan="4">311</td><td rowspan="2">149</td><td rowspan="2">356</td></tr>
<tr><td>4,6,8</td><td>M</td></tr>
<tr><td rowspan="2">250</td><td>2</td><td rowspan="2">S</td><td rowspan="4">640</td><td rowspan="4">550</td><td rowspan="4">168</td><td rowspan="4">24</td><td rowspan="4">406</td></tr>
<tr><td>4,6,8</td></tr>
<tr><td rowspan="2">250</td><td>2</td><td rowspan="2">M</td><td rowspan="2">349</td></tr>
<tr><td>4,6,8</td></tr>
</table>

Конструирование оболочки асинхронного двигателя со степенью защиты IP23 начинается с вычерчивания наружного контура попереч-

ного вида двигателя по данным таблицы 10.7. Затем наносится внутренний контур станины (толщина стенки станины выбирается по рис. 10.5). Показывается отверстие в торце станины, через которое вводится обмотанный и пропитанный сердечник статора. Торцевые отверстия в станине и аксиальные ребра протачиваются под посадку сердечника статора, поэтому на сборочном чертеже диаметр отверстий принимается равным наружному диаметру сердечника статора D_a (центр окружности находится на расстоянии h от опорной плоскости). Затем изображаются аксиальные ребра, в которые впрессовывается сердечник статора (верхнее и нижнее и по два ребра на каждую сторону через 60°). Далее показывается торцевая цилиндрическая часть станины, на которую крепится подшипниковый щит. По обоим цилиндрическим торцам в станине делают наружные кольцевые заточки (наружные замковые поверхности), на которые надвигаются подшипниковые щиты, имеющие внутренние кольцевые заточки. Все выбранные размеры станины вносятся в таблицу 10.8.

Таблица 10.8

Размеры станины асинхронного двигателя со степенью защиты IP23

Высота оси вращения h, мм	Условная длина станины	Габаритные размеры		Наружный диаметр статора D_a, мм	Толщина стенки станины h_2,мм	Расстояние h_1, мм*	Длина станины $L_{корп}$**, мм
		b_{30}, мм	h_{31}, мм				

* h_1 определяют по рис. 10.5;

** $L_{корп}$ определяют по продольному разрезу двигателя

Коробки выводов

В асинхронных двигателях со степенью защиты IP44, IP54 и IP23 и высотой оси вращения $h \leqslant 250$ мм коробка выводов размещается сверху станины и имеет прямоугольную форму (рис. 10.6).

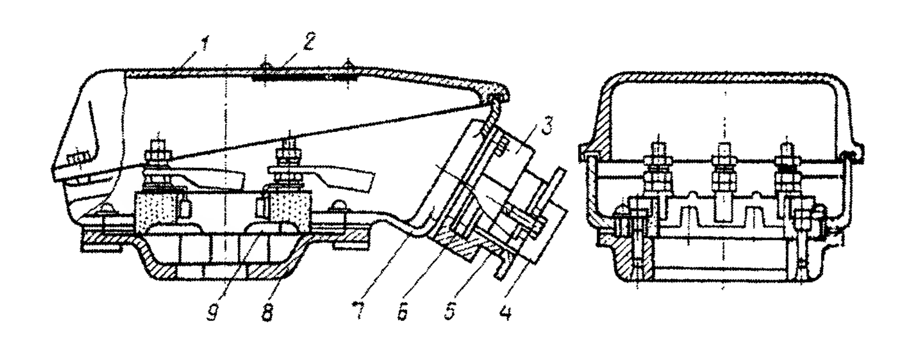


Рис. 10.6. Коробка выводов для двигателей h=160...250 мм:
1 — крышка; *2* — табличка-схема; *3* — гнездо; *4* — втулка; *5* — уплотнительная втулка; *7* — корпус; *8* — патрубок; *9* — панель с контактными болтами

Приняты следующие размеры этой коробки: высота $h_к$=(0,5...0,55)h; длина $l_к$=2,4$h_к$; ширина $b_к$=1,3$l_к$. В машинах с корпусом из алюминиевого сплава с продольно-поперечными ребрами (h=45...112 мм) коробка выводов отливается совместно с корпусом, а в машинах с корпусом из чугуна коробки выводов и их крышки отливаются отдельно из алюминиевого сплава. В коробке выводов имеется болт для подвода заземляющего проводника. Такой же болт предусмотрен на корпусе двигателя. Размеры коробки выводов запишите в таблицу 10.9.

Таблица 10.9

Размеры коробки выводов

h, мм	$h_к$, мм	$l_к$, мм	$b_к$, мм

Подшипниковые щиты

Подшипниковые щиты асинхронных двигателей — литые чугунные или из алюминиевого сплава. У двигателей со степенью защиты IP23 и высотами оси вращения 160—250 мм подшипниковые щиты имеют вид ступицы и обода, соедниненных шестью ребрами-спицами. В

центральную часть ступицы встраивается подшипниковый узел, а обод служит для соединения подшипникового щита с корпусом. Снаружи подшипниковые щиты закрывают жалюзи. Жалюзи могут быть отлиты вместе с подшипниковым щитом.

Подшипниковые щиты двигателей со степенью защиты IP44, IP54 сплошные, могут иметь наружные ребра для улучшения охлаждения и внутренние ребра для крепления диффузоров, создающих направленный поток воздуха внутри корпуса.

Подшипниковые щиты крепятся к корпусу с помощью четырех или шести болтов. Допуски на обработку поверхностей посадки щитов в станину обеспечивают необходимую точность центровки ротора относительно статора, и следовательно, точность размера воздушного зазора двигателя.

Подшипниковые щиты выполняют с внутренними замковыми поверхностями, что позволяет повысить точность размеров их посадочных поверхностей за счет одновременной обработки спаренным инструментом замковой поверхности щита и поверхности отверстия щита под подшипник.

Зазоры между подшипниковыми щитами и вылетами лобовых частей обмотки статора, а также вентиляционными лопатками ротора не должны быть более 15—20 мм. Если в конструкции двигателя предусмотрена установка диффузоров, то зазоры между диффузорами и вентиляционными лопатками ротора должны быть 5—7 мм.

В двигателях с h=200...250 мм и степенью защиты IP44, IP54 простое перемешивание воздуха оказывается недостаточно эффективным. Поэтому в этих машинах для увеличения скорости обдува лобовых частей и улучшения таким путем отвода теплоты к щитам применены направляющие диффузоры, укрепляемые на оребренных с внутренней стороны подшипниковых щитах. Диффузоры служат для разделения областей вентиляционного тракта с пониженным перед вентиляционными лопатками и повышенным (выше вентиляционных лопаток) давлением. При такой системе внутренней циркуляции воздух под давлением вентиляционных лопаток поступает в зоны лобовых частей об-

мотки, проходит затем через полости, образованные направляющими диффузорами и подшипниковыми щитами, отдает последним часть теплоты и вновь направляется лопатками ротора в зону лобовых частей.

Во всех двигателях со степенью защиты IP23 устанавливают диффузоры для улучшения отвода теплоты. Охлажденный воздух проходит внутрь корпуса через жалюзи в подшипниковых щитах, и направляется диффузорами на вентиляционные лопатки, отлитые вместе с замыкающими кольцами ротора. Вентиляционные лопатки отбрасывают воздух на лобовые части обмотки ротора. Далее воздух омывает наружную поверхность сердечника статора и выбрасывается через жалюзи, расположенные по бокам в нижней части станины машины.

Подшипниковые узлы

Подшипниковый узел (рис. 10.7) состоит из подшипников, подшипниковых крышек, закрывающих их с одной или двух сторон, элементов уплотнения, фиксирующих и крепежных деталей (шайб, стопорных колец, гаек и т. д.). Подшипниковые крышки предназначены для защиты подшипника от воздействия внешней среды, а также для удержания смазки в зоне подшипника (в подшипниках без уплотнений).

Подшипниковые крышки обычно изготавливают из чугуна. В малых машинах, где крышки плавающей опоры практически не воспринимают механических нагрузок, их могут выполнять из алюминиевых сплавов или нагревостойкой резины. Для уменьшения вибраций, вызванных наличием зазоров между телами качения и обоймами подшипника, в подшипниковых узлах применяют волнистые пружины; они обеспечивают постоянное касание с определенным усилием тел качения с соответствующими дорожками на обоймах подшипника. При использовании шарикоподшипников волнистые пружины устанавливают в обеих опорах, а роликоподшипников — только на «фиксирующей» опоре.

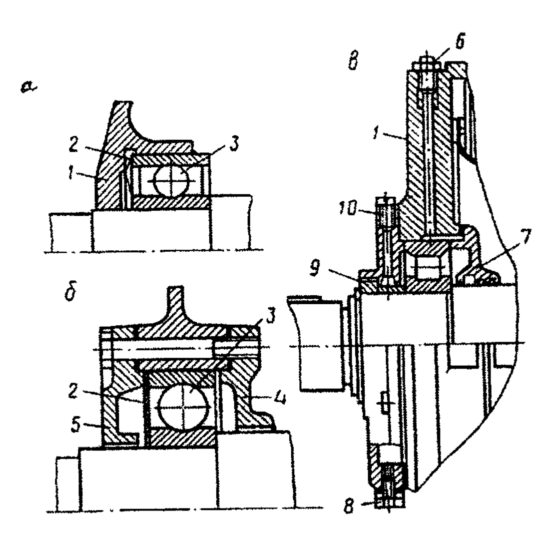


Рис. 10.7. Подшипниковые узлы с шариковыми подшипниками с двусторонним уплотнением (*а*), с двумя крышками (*б*), с устройством для пополнения смазки (*в*):

1 — подшипниковый щит, *2* — волнистая пружина, *3* — шарикоподшипник, *4, 5* — крышки, *6* — масленка, *7* — войлочные уплотнения, *8* — спускная коробка, *9* — стопорное кольцо, *10* — пробка

В двигателях применяют два вида конструкции уплотнений подшипниковых узлов: бесконтактное щелевое и комбинированное контактное. При щелевом уплотнении уплотняющим элементом служит зазор между валом и подшипниковой крышкой, усиленный двумя концентрическими канавками. Смазка, заполняющая эти канавки, препятствует загрязнению подшипника. В комбинированном контактном уплотнении уплотняющим элементом служит войлочное кольцо с лабиринтом в наружной крышке подшипника и щелевым уплотнением с концентрическими канавками на внутренней крышке. Комбинированное уплотнение используется главным образом в двигателях специализированных исполнений по условиям окружающей среды. В случае использования шарикоподшипников с двухсторонним уплотнением

можно не применять уплотняющее устройство, т. е. упрощается конструкция подшипникого узла.

Конструкция вентиляционного узла

Конструкция вентиляционного узла двигателя со степенью защиты IP 44 и способом охлаждения IC0141 приведена на рис. 10.8.

Вентиляционный узел двигателя состоит из центробежного вентилятора и защитного кожуха, служащего одновременно направляющим диффузором.

В двигателях с $h \leqslant 132$ мм вентилятор и кожух изготовлены из высокопрочной и термостойкой пластмассы. В двигателях с h=160÷355 мм вентилятор тарельчатый из алюминиевого сплава (см. рис. 10.8) с армированной чугунной втулкой. Кожух стальной штампованный, имеет с торца решетку для входа воздуха. Окна решетки имеют размеры не более 8×8 мм, что обеспечивает установленные требования по технике безопасности. Посадка вентилятора на вал для двигателей с h $\leqslant$ 112 мм осуществляется с помощью рифления на валу, а при $h \geqslant 160$ мм — посредством шпонки.

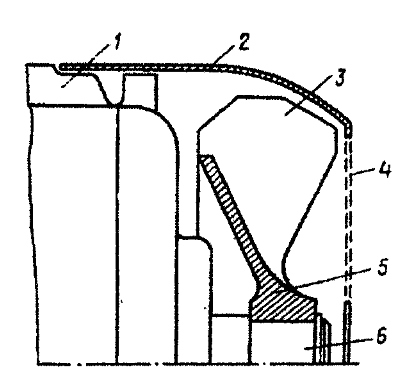


Рис. 10.8. Вентиляционный узел:
1 — оребрение корпуса (станнна); *2* — кожух вентилятора; *3* — лопатки вентилятора; *4* — решетка для входа воздуха; *5* — корпус вентилятора; *6* — вал

Наружный диаметр вентилятора $D_{вен2} \approx 0,85\ D_{корп}$, ширина лопатки $l_л \approx 0,2\ D_{корп}$, число лопаток при $n \leqslant 1500$ об/мин $N_л \approx 1,25\sqrt[3]{D_{корп}}$, при $n > 1500$ об/мии $N_л \approx \sqrt[3]{D_{корп}}$. (таблица 10.10).

Таблица 10.10

Размеры вентилятора

$D_{вен\ 2}$, мм	$l_л$, мм	$N_л$, шт

На завершающем этапе разработки конструкции рассчитанного двигателя иеобходимо предусмотреть крепежные отверстия в стаиине и их привязку к корпусу двигателя.

К каждому значению h привязаны определенные устаиовочные и присоединительные размеры, регламентироваиные ГОСТ 18709 для h=56÷400 мм и ГОСТ 20839 для h>400 мм. Эти стандарты соответствуют рекомеидациям МЭК 72, МЭК 72А и ИСО Р775. Стандартизированиые значения h и связанные с ними установочно-присоединенные размеры (в мм) приведены в таблице 10.7 для двигателей со степенью защиты IP23 и в таблице 10.11 для двигателей со степенью защиты IP44 (54). По таблицам 10.7 и 10.11 выбираются установочные и присоединительиые размеры l_{31}, l_{10}, b_{10} и d_{10}.

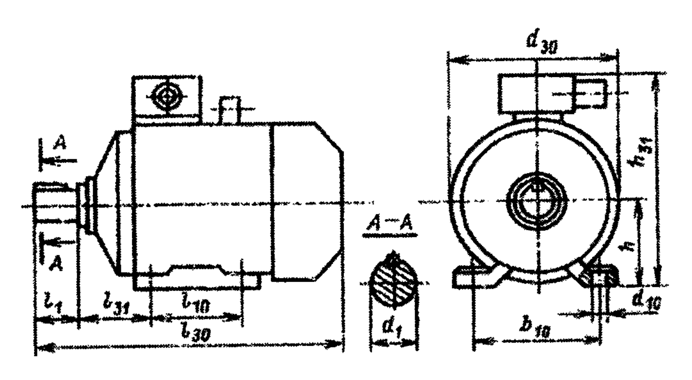


Рис. к табл. 10.11

Таблица 10.11

Габаритные, установочные и присоединительные размеры двигателей: исполнение IM1081, степень защиты IP44, IP54, h=50÷250 мм

h, мм	Число полюсов	Условная длина станины	Габаритные размеры, мм		Установочные и присоединительные размеры, мм			
			h_{31}	d_{30}	l_{10}	l_{31}	d_{10}	b_{10}
50	2,4	—	142	112	63	32	5,8	80
56	2,4	—	152	128	71	36	5,8	90
63	2,4,6	—	164	138	80	40	7	100
71	2,4,6,8	—	201	170	90	45	7	112
80A	2,4,6,8	—	218	186	100	50	10	125
80B	2,4,6,8	—						
90	2,4,6,8	L	243	208	125	56	10	140
100	2,4,6,8	S	265	235	112	63	12	160
100	2,4,6,8	L	280		140			
112	2,4,6,8	M	310	260	140	70	12	190
132	2,4,6,8	S	350	302		89		216
132	2,4,6,8	M			178			
160	2 4,6,8	S	430	358	178	108	15	254
160	2 4,6,8	M			210			
180	2 4,6,8	S	470	410	203	121		279
180	2 4,6,8	M			241			
200	2 4,6,8	M	535	450	267	133	19	318
200	2 4,6,8	L			305			
225	2 4,6,8	M	575	494	311	149		356
250	2 4,6,8	S	640	554		168	24	406
250	2 4,6,8	M			349			

После завершения сборочного чертежа двигателя заполняется таблица 10.12.

Таблица 10.12

Габаритные, установочные и присоединительные размеры спроектированного двигателя

Габаритные размеры, мм			Установочные и присоединительные размеры, мм						
l_{30}	h_{31}	$b_{30}(d_{30})$	l_1	l_{10}	l_{31}	d_1	d_{10}	b_{10}	h

Примечание. Обозначения габаритных, установочных и присоединительных размеров соответствуют: IP44(54) - рис. к табл. 10.11, IP23 — рис. к табл. 10.7.

11. КОНСТРУИРОВАНИЕ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Общие положения

Взрывозащищенное электрооборудование и, в частности, взрывозащищенные электродвигатели используются в основиом в угольной, нефтяной, газовой и химической промышленностях. В угольной промышленности взрывозащищенное злектрооборудование применяется в шахтах, опасных по газу и (или) пыли, обогатительных фабриках и в других взрывоопасных производствах.

Асинхронные двигатели, используемые во взрывоопасиых зонах, должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 51330.0-99 (МЭК 60079-0-98) «Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 0. Общие требования», а также требованиям Правил устройства электроустановок (ПУЭ).

Конструирование взрывозащищениых асинхронных двигателей ведется по тем же принципам, что и конструирование асинхронных двигателей общего назначения (см. параграф 10), но с учетом требований, предъявляемых к взрывозащищенному электрооборудованию.

Все взрывозащищенное электрооборудование подразделяется на две группы:

I — рудничное взрывозащищенное электрооборудование, предназначенное для применения в подземных выработках шахт, рудников и в их наземных строениях, опасных по рудничному газу и/или горючей пыли;

II — взрывозащищенное электрооборудование для внутренней и наружной установки, предназначенное для потенциально взрывоопасных сред, кроме подземных выработок шахт и рудииков и их наземных строений, опасных по рудничному газу и/или горючей пыли.

Взрывозащита электрооборудования может достигаться различными способами, большинство из которых основаны на методе физиче-

ской изоляции электрических контактов или горячих поверхностей от взрывоопасных смесей. К таким видам взрывозащиты относятся: герметизация компаундом — *m*, масляное заполнение оболочки — о, заполнение или продувка оболочки под избыточным давлением — *р*.

В то же время существуют два вида взрывозащиты, которые предусматривают непосредственный контакт взрывоопасной среды с токонесущими частями электрооборудования—это искробезопасная электрическая цепь (ИБЦ) — *i* и взрывонепроницаемая оболочка — *d*.

Принцип работы ИБЦ основывается на ограничении энергии, запасенной в электрической цепи, до безопасного уровня, при котором исключается воспламенение опасных веществ (ОВ) даже при коротком замыкании цепи или её обрыве, когда на оборванных контактах появляется напряжение холостого хода.

Для выполнения требований по уровню взрывозащиты ГОСТ Р 51330.10-99 устанавливает дополнительное разделение взрывозащиты вида ИБЦ на уровни «*ia*», «*ib*» или «*ic*». Различие между этими уровнями заключается в степени надежности этой цепи. Так, цепи уровня «*ia*» ие должны вызывать воспламенения взрывоопасиой смеси даже при двух повреждениях, нарушающих требования данного ГОСТа, цепи уровня «*ib*» — при одном повреждении, а цепи уровня «*ic*» не допускают таких повреждений.

Вид защиты «взрывонепроницаемая оболочка» основывается на идее сдерживания взрыва. То есть в данном случае допускается возникновение взрыва внутри оболочки, однако её конструкция гарантирует, что не произойдет распространения взрыва во внешнюю среду.

При применении защит искробезопасная электрическая цепь — *i* и взрывонепроницаемая оболочка — *d* электрооборудование группы II разделяются на три подгруппы II А, II В, II С. Это деление вызвано тем, что в зависимости от категории взрывоопасной смеси предъявляются различные требования к зазорам во взрывонепроницаемой оболочке и уровню ограничения энергии в ИБЦ.

Взрывозащищенное электрооборудование групп I и II в зависимости от уровня взрывозащиты подразделяется:

— на электрооборудование повышенной надежности против взрыва, т. е. взрывозащищенное электрооборудование в котором взрывозащита обеспечивается только в признанном нормальном режиме его работы;

— на взрывобезопасное электрооборудование, т. е. взрывозащищенное электрооборудование, в котором взрывозащита обеспечивается как при нормальном режиме работы, так и при повреждениях, определяемых условиями эксплуатации, кроме повреждения средств взрывозащиты;

— на особовзрывобезопасное электрооборудование, т. е. взрывозащищенное электрооборудование, в котором по отношению к взрывобезопасному электрооборудованию приняты дополнительные средства взрывозащиты.

При эксплуатации взрывозащищенного электрооборудования ограничивается максимальная температура его поверхности. Для электрооборудования I группы максимальная температура поверхности не должна превышать:

— 150 °С в случае поверхностей, на которых возможно отложение угольной пыли в виде слоя;

— 450 °С кратковременно, когда превышение температуры сверх 150 °С и последующее охлаждение до температуры 150 °С произойдет за время не более 180 с;

— 450 °С, если исключено отложение угольной пыли в виде слоя (например, благодаря герметизации или вентиляции).

Электрооборудование группы II классифицируют по температурным классам согласно таблице 11.1.

Максимальная температура электрооборудования группы II, предназначенного для производств, опасных по пыли, должна быть ниже на 50 °С температуры тления или не более двух третей температуры самовоспламенения (для нетлеющих пылей).

Во всех случаях для электрооборудования групп I и II максимальная температура поверхности не должна быть выше значения наименьшей температуры самовоспламенения данной взрывоопасной сре-

ды (атмосферы). Исключение составляют детали с площадью поверхности менее 10 см^2, температура которых может превышать максимальную на 50 °C для температурных классов Т1—Т3 и на 25 °C для температурных классов Т4—Т6 и для группы I.

Таблица 11.1

Максимальная температура поверхности для электрооборудования группы II

Температурный класс	Максимальная температура поверхности, °C	Температурный класс	Максимальная температура поверхности, °C
Т1	450	Т4	135
Т2	300	Т5	100
Т3	200	Т6	85

Следовательно, чтобы выбрать уровень взрывозащиты электрооборудования, необходимо знать в какой окружающей среде будет эксплуатироваться это электрооборудование.

Взрывоопасные зоны, в зависимости от частоты и длительности присутствия взрывоопасной газовой смеси, делятся на три класса.

Зона класса 0 — взрывоопасная газовая смесь присутствует постоянно или в течение длительного периода.

Зона класса 1 — существует вероятность присутствия взрывоопасной газовой смеси в нормальных условиях эксплуатации.

Зона класса 2 — маловероятно присутствие взрывоопасной смеси в нормальных условиях эксплуатации, а если она возникает, то редко, и существует очень непродолжительное время.

В зарубежной практике принято, что время присутствия взрывоопасной среды для зоны класса 0 составляет более 1000 часов в течеиие года (10 %), для зоны класса 1 — от 10 до 1000 часов (0,1—10 %), для зоны класса 2 — от 1 до 10 часов (0,01— 0,1 %). Взрывобезопасной считается зона, в которой взрывчатая среда присутствует менее 1 часа в течение года. Процентное соотношение взято из расчета, что рабочий год составляет 8760 часов, округляют до 10 000 ч.

Уровни взрывозащиты электрооборудования

Электрооборудование повышенной надежности против взрыва может обеспечиваться:

- взрывозащитой вида «*i*» с уровнем искробезопасной электрической цепи «*ic*» н выше;
- взрывозащитой вида «*p*», имеющей устройство сигнализации о недопустимом снижении давления;
- взрывозащитой вида «*q*»;
- защитой вида «*e*»;
- защитой вида «*m*»;
- взрывозащитой вида «*d*»для электрооборудования повышенной надежности против взрыва;
- масляным заполнением для электрооборудования группы II и заполнением негорючей жидкостью для электрооборудования группы I оболочек, удовлетворяющих требованиям взрывозащиты вида «о»;
- взрывозащитой вида «*s*».

Взрывобезопасное электрооборудование может обеспечиваться:

- взрывозащитой вида «*i*» с уровнем искробезопасной электрической цепи не ниже «*iв*» ;
- взрывозащитой вида «*p*» с устройством сигнализации и автоматического отключеиия напряжения питания, кроме искробезопасных цепей уровня «*ia*», при недопустимом снижении давления;
- взрывозащитой вида «*d*» для взрывобезопасного электрооборудования;
- специальным видом взрывозащиты «*s*»;
- защитой вида «*e*», заключенной во взрывонепроницаемую оболочку;
- заключением в оболочку, предусмотренную для защиты «*p*» с устройством сигнализации о снижении давления ниже до-

пустимого значения электрооборудования группы II с защитой вида «*e*».

Особовзрывобезопасное электрооборудование может обеспечиваться:

- взрывозащитой вида «*i*» с уровнем искробезопасной электрической цепи «*ia*» ;
- специальным видом взрывозащиты «*s*»;
- взрывобезопасным электрооборудованием с дополнительными средствами взрывозащиты (например, заключением искробезопасных частей, залитых компаундом или погруженных в жидкий или сыпучий диэлектрик, во взрывонепроницаемую оболочку, или продуванием взрывонепроницаемой оболочки чистым воздухом под избыточным давлением при наличии устройств контроля давления, сигнализации и автоматического отключения напряжения при недопустимом снижении давления или при повреждении взрывонепроницаемой оболочки). При этом для отходящих соединений должен обеспечиваться уровень искробезопасных цепей «*ia*».

Основные принципы конструирования взрывозащищенных асинхронных двигателей

При конструировании взрывозащищенных асинхронных двигателей их взрывозащищенность обеспечивается специальными средствами, которые условно можно разделить на две группы.

К первой группе относится вид взрывозащиты «*d*».

Взрывозащищенность двигателей, выполненных с видом взрывозащиты «*d*» достигается за счет заключения частей, могущих воспламенить взрывоопасные смеси, во взрывонепроницаемую оболочку, которая выдерживает давление взрыва внутри иее и исключает его передачу в окружающую взрывоопасиую среду.

Прочность взрывонепроницаемых элементов оболочки проверяется при её изготовлении путем гидравлических испытаний избыточным

давлением 1—1,5 МПа в течение 10 с, не менее. Взрывонепроницаемость оболочки обеспечивается применением щелевой взрывозащиты.

На чертеже средств взрывозащиты (рис. 11.1) показаны сопряжеиия деталей и сборочных единиц двигателей, обеспечивающих щелевую взрывозащиту. Эти сопряжения обозначены словом «Взрыв» с указанием допустимых по ГОСТ 22782.6-81 — для Украины и ГОСТ Р 51330.1-99 — для России параметров взрывозащиты:

— максимальной ширины и минимальной длины щелей;

— класса шероховатости поверхностей прилегания, образующих взрывонепроницаемые щели.

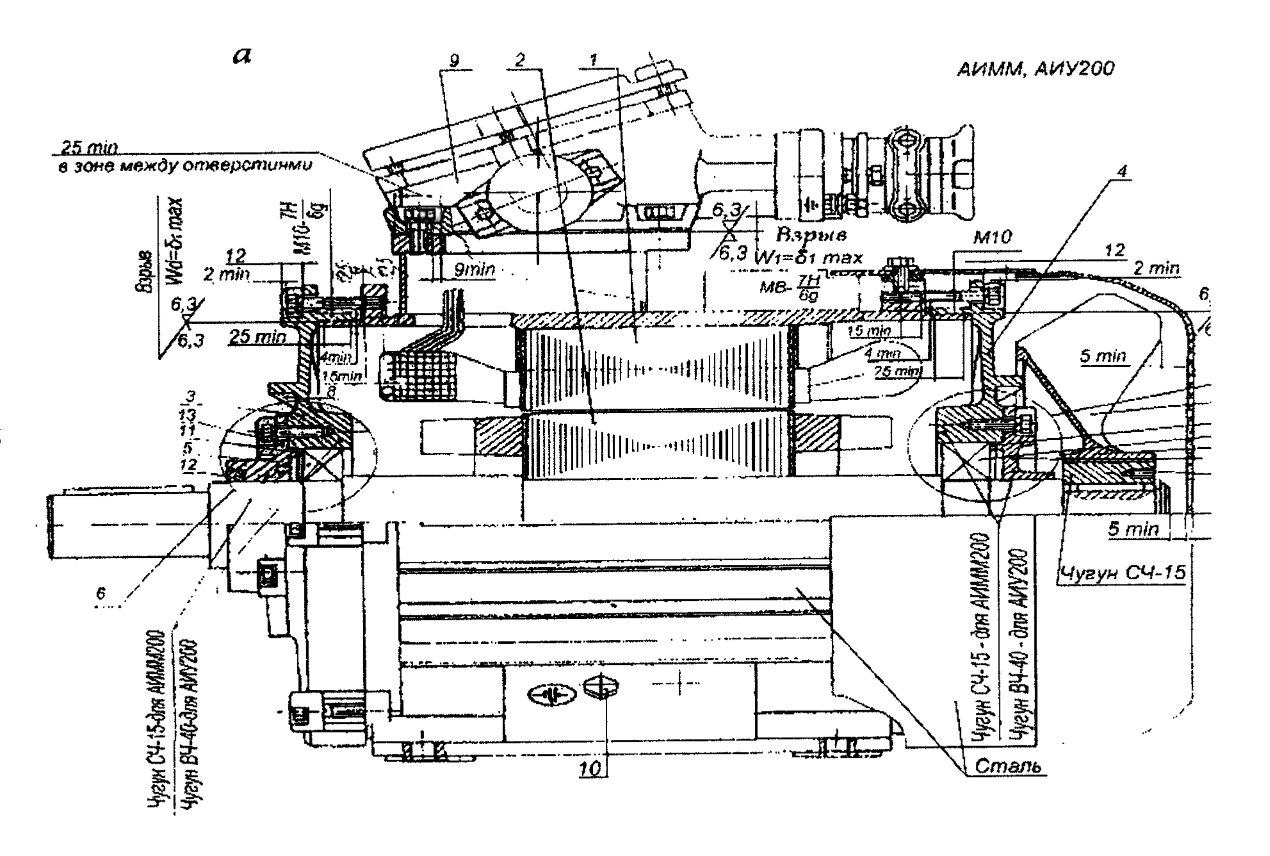
Взрывонепроницаемые поверхности должны быть защищены от коррозии смазкой (Литол-24 ГОСТ 21150-87, ЦИАТИМ-221 ГОСТ 9433-80).

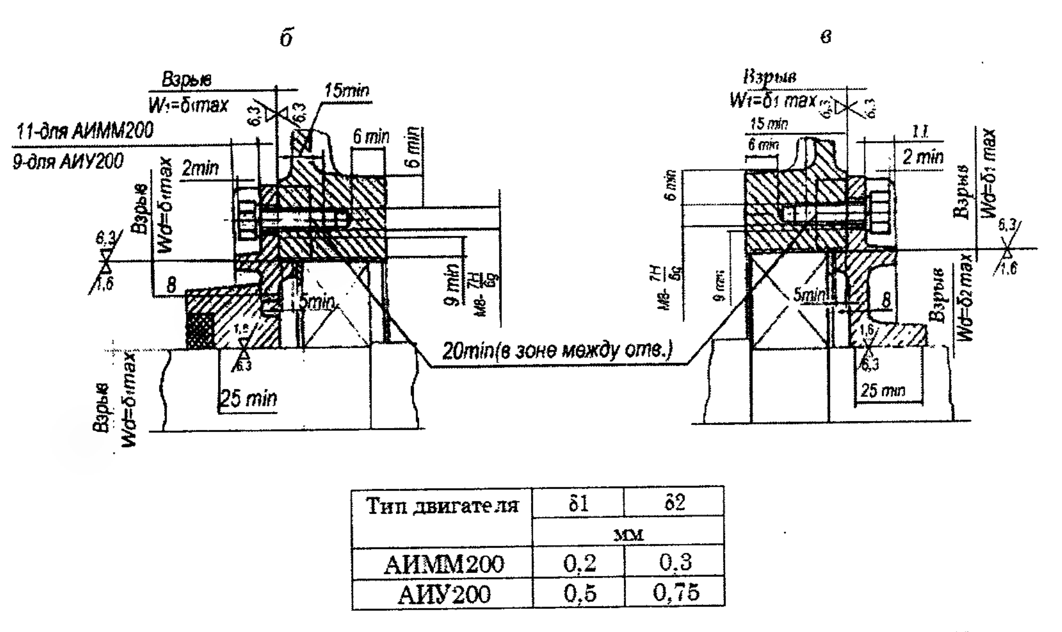
Взрывонепроницаемость кабельного ввода достигается уплотнением с помощью эластичного резинового кольца (рис. 11.2).

Все наружные болты и гайки, крепящие детали, а также токоведущие и заземляющие зажимы предохранены от самоотвинчивания применением пружинных шайб и контргаек. Доступ к наружным крепежным элементам возможен только с помощью специального торцового ключа. Степень защиты двигателей от внешних воздействий IP54.

К средствам защиты *второй группы* обычно относят следующие виды защит: искробезопасная электрическая цепь «*i*», масляное заполнение оболочки «о», заполнение или продувка оболочки под избыточным давлением «*p*», герметизация компаундом «*m*» и специальные виды защит «*s, n, e*».

Большинство взрывозащищенных двигателей конструируется со взрывонепроницаемой оболочкой с видом взрывозащиты «*d*». Взрывонепроницаемая оболочка включает: станину, подшипниковые щиты, подшипниковые узлы, коробку выводов и крепежные элементы.


а
АИММ, АИУ200
25 min
в зоне между отверстинми
Взрыв
$W_1=\delta_1$ max
Взрыв
Wd=δ₁ max
M10-7H/6g
M8-7H/6g
M10
12
2 min
6,3
25 min
9min
15 min
4 min
25 min
5 min
4min
1,5min
3
13
11
5
12
1
2
9
4
6
10
Чугун СЧ-15
Чугун СЧ-15 - для АИММ200
Чугун ВЧ-40 - для АИУ200
Чугун СЧ-15-для АИММ200
Чугун ВЧ-40-для АИУ200
Сталь



Тип двигателя	δ1	δ2
	мм	
АИММ200	0,2	0,3
АИУ200	0,5	0,75

Рис. 11.1. Взрывозащищенный асинхронный двигатель типов АИММ200 и АИУ200:

а — продольный разрез, *б*, *в* — подшипниковые узлы:

1 — статор; *2* — ротор; *3*, *4* — щиты подшипниковые; *5*, *6* — подшипники; *7* — вентилятор; *8* — кожух; *9* — вводное устройство; *10* — болт заземления; *11* — пружина кольцевая волнистая; *12* — кольцо уплотнительное; *13*, *14* — крышки подшипниковые

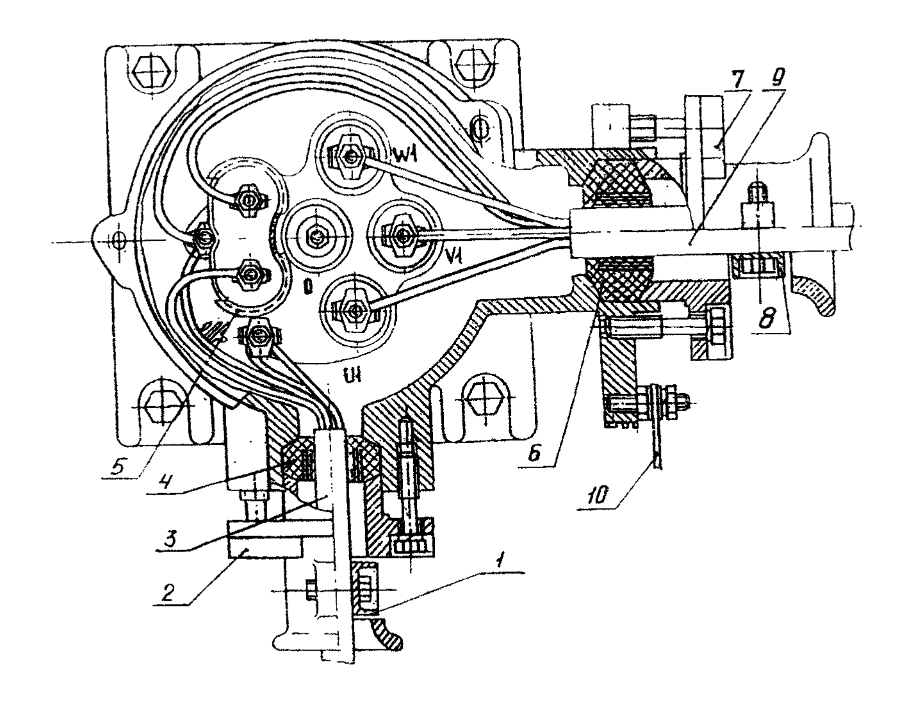


Рис. 11.2. Разделка кабеля с резиновой изоляцией в коробке выводов с цепью управления для двигателей АИУ160, 180, 200:
1 — скоба; *2* — муфта кабельная; *3* — кабель низковольтной цепи; *4* — кольцо уплотнительное; *5* — перегородка; *6* — кольцо уплотнительное; *7* — муфта кабельная; *8* — скоба; *9* — силовой кабель; *10* — шина наружного заземления

Все части взрывонепроницаемой оболочки должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 51330.1-99 (МЭК 60079-1-98) «Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 1. Взрывозащита вида «взрывонепроницаемая оболочка».

Станины

Во взрывозащищенных электродвигателях станина служит не только остовом для закрепления всех неподвижных деталей, но и взрывозащитной оболочкой.

Станины двигателей для работы в условиях подземных выработок должны изготовляться из стали (литыми или сварными) или из высокопрочного чугуна с характеристиками, близкими к характеристикам стали: пределы прочности при растяжении 400 МПа (40 кгс/мм^2), предел текучести не менее 200 МПа (20 кгс/мм^2), относительное удлинение не менее 10 %, ударная вязкость не менее 3,5 кДж/м^2 (3,5 кгс·м/мм^2), твердость по Бринеллю в пределах 140—207. Для двигателей со свободным объемом не свыше 2,5 л допускается применение серого чугуна по прочности не ниже СЧ 15-32.

Для взрывозащищенных двигателей других назначений станины могут выполняться из стали или чугуна СЧ 15-32 независимо от свободного объёма полости двигателя.

Конструктивные формы и исполнения станин взрывозащищенных электродвигателей зависят от назначения двигателей и системы охлаждения.

Двигатели, предназначенные для установки в подземных выработках, должны иметь упрочненные конструкции станин, без выступающих частей, с минимальным количеством ребер. Рекомендуется станины проектировать с равномерно расположенными ребрами с учетом возможности применения механизированных способов их приварки. Ребра не должны иметь острых кромок, а края их должны заканчиваться скруглением или фасками.

Станины двигателей для угольных комбайнов должны иметь форму, согласующуюся с конфигурацией угольного комбайна. Двигатели, предназначенные для применения в помещениях и наружных установках, могут иметь станины облегченной конструкции. Очень часто с целью унификации стаиины машин с различным иазначением объединяют, выбирая оптимальный вариант.

В зависимости от системы охлаждения станины могут иметь следующие конструктивные исполнения:

— гладкая чугунная или стальная (сварная) труба;

— оребренная чугунная или стальная (сварная) труба. Ребра отлиты или наварены по образующим цилиндра или расположены перпендикулярно образующей цилиндра;

— стальная сварная конструкция с охлаждающими трубами по всей окружности корпуса.

Если станины имеют наружные охлаждающие ребра, то толщину этих ребер независимо от размеров двигателя рекомендуется принимать:

— для стальных станин — не менее 4 мм;

— для чугунных станин — не менее 6 мм.

На трубе станины обычно расположены лапы для крепления двигателя к фундаменту и патрубок для установки коробки выводов.

Толщина стенок станин должна выбираться, исходя из требований обеспечения взрывоустойчивости оболочки. Поэтому толщину стенок выбирают не менее 4 мм для стальных станин и не менее 6 мм для чугунных станин. Проверка оболочки станины на соответствие требованиям взрывоустойчивости проводится методом гидроиспытания. Ориентировочные значения давления для расчета и испытания опытных образцов оболочек взрывозащищенного оборудования приведены в таблице 11.2.

Таблица 11.2

Ориентировочные значения давления для расчета и испытания опытных образцов оболочек электрооборудования

Подгруппа электрооборудования	Ориентировочные значения расчетного давления, МПа, при свободном объеме оболочки, $см^3$				
	до 100	св. 100 до 500	св. 500 до 2000	св. 2000 до 10000	св. 10000
I	0,3	0,6	0,7	0,8	0,9
II A, II B	0,4	0,4	0,8	1,0	1,0
II C	0,5	0,6	0,8	1,0	1,0

Расчет толщины стенки станины проводится, исходя из давления, возникающего при взрыве взрывоопасной смеси внутри машины.

Толщина стенки выбирается конструктором, исходя из опыта конструирования, и проверяется по допустимым механическим напряжениям:

$$\sigma = PR/b, \tag{11.1}$$

где P — давление внутри оболочки двигателя, Па; R — радиус оболочки; σ — допустимое механическое напряжение, Па; b — толщина стенки оболочки.

Для стали Ст.3 допустимые напряжения σ = 150 МПа (1500 кгс/мм^2). Основной частью расчета станин является определение жесткости. Жесткость станины является необходимым условием надежной работы двигателя. Это связано с тем, что в асинхронных взрывозащищенных двигателях малы зазоры между статором и ротором, а также в подвижных взрывозащитных соединениях, и деформации станин могут вызвать недопустимые искажения зазора между статором и ротором или нарушение взрывозащиты.

Расчет на жесткость проводится по тем же методикам, что и для двигателей общепромышленного применения.

Станины взрывозащищенных электродвигателей, предназначенных для установки в подземных выработках на передвижных установках, должны выдерживать без потери взрывонепроницаемых свойств испытания сбрасыванием на бетонное основание с высоты 0,5 м и испытания ударом бойка радиусом R=25 мм с энергией удара 70 Н·м (7 кгс·м).

Подшипниковые щиты

Подшипниковые щиты закрывают активные части двигателя с обеих сторон корпуса, являются частью взрывонепроницаемой оболочки и служат опорой для подшипников.

Для двигателей средней мощности (до 400 кВт) материалом для подшипниковых щитов чаще всего служит высокопрочный чугун или

серый чугун повышенной прочности, так как он дешевле, хорошо заполняет литейные формы и легко обрабатывается.

Подшипниковые щиты из чугуна трудно поддаются расчету на механическую прочность, поэтому толщину стенки выбирают по технологическим соображениям, принимая во внимание удобство отливки и необходимую жесткость щита при обработке.

Проверка щитов на соответствие требованиям взрывоустойчивости проводится методом гидроиспытания.

Для крупных двигателей и двигателей забойных механизмов щиты необходимо выполнять из стали. Щиты имеют наружное или внутреннее оребрение (радиальное или кольцевое). Наличие ребер на щитах улучшает их охлаждение и повышает механическую прочность.

Для спокойного хода двигателя необходимо обеспечить концентричность поверхности заточки корпуса в месте посадки щита с поверхностью в щите для посадки подшипника и соосность этих поверхностей. Поэтому крепление щита должно быть выполнено таким образом, чтобы подшипниковый щит при затяжке крепежных болтов не мог перекашиваться.

Соединение подшипникового щита со станиной носит название «замок». Замок служит для центрирования подшипникового щита. Если буртик подшипникового щита входит в расточку станины, то замок внутренний, а если подшипниковый щит надвигается на кольцевой поясок станины, то замок наружный. Для взрывозащищенных двигателей рекомендуется выполнять щиты, которые входят в расточку станины, т. е. внутренний замок. Связано это с тем, что при возможных соударениях деталей могут повредиться взрывозащитные поверхности замка, после чего деталь для дальнейшего использования стаиовится непригодной.

Возможность повреждения замка на станине при этом будет меньше, что значительно снижает потери от брака.

По заходной кромке щита должна быть предусмотрена фаска под углом 30° с катетом не менее 1 мм. Это необходимо для исключения

задиров по взрывозащитной поверхности станины при запрессовке щита в станину в процессе сборки двигателя.

Подшипниковые щиты крепятся к станине с помощью болтов или шпилек. Щиты машин мощностью до 100 кВт на ушках для крепления должны иметь специальные потаи, которые позволяют отвинчивать болт или гайку только с помощью специального торцевого ключа.

При расчете крепежных болтов пользуются формулой

$$F = Z\pi d^2/4 = Q/(0{,}6\,\sigma_т),$$

откуда определяется внутренний диаметр резьбы болта, м:

$$d = \sqrt{Q/(0{,}47\sigma_т Z)}, \qquad (11.2)$$

где z — число болтов; Q — сила, действующая на все болты, Н; $\sigma_т$ — предел текучести материала болта, Па, выбирается по таблице 11.3; F — сечение болта по внутреннему диаметру резьбы, м^2.

Таблица 11.3

Предел текучести стали

Марки стали	Ст. 3	Ст. 4	Ст. 5	10	15	20	25	30	35	40	45
	ГОСТ 380-71			ГОСТ 1050-60							
$\sigma_т$, МПа	226	246	266	206	226	246	275	296	315	335	355

В расчетах крепежных деталей взрывозащищенных оболочек $\sigma_т$ должен выбираться для стали марки 10.

Сила, действующая на все болты, Н:

$$Q = \frac{\pi}{4}(D^2 - d_п^2)p, \qquad (11.3)$$

где D — диаметр посадки щита в станину, м; $d_п$ — наружный диаметр подшипника, м; p — расчетное давление, Па, принимаемое равным полуторакратному реальному давлению взрыва, которое определяется при испытании опытных образцов.

При предварительных расчетах болтовых соединений значение p рассчитывается по данным таблицы 11.2. По согласованию с контрольной организацией допускается принимать p равным полуторакратному давлению, полученному на идентичных двигателях.

Наружный диаметр болта принимается по справочнику (ближайшее значение).

При проверочном расчете болтов необходимо пользоваться формулой

$$k=\sigma_т /\sigma, \tag{11.4}$$

где k — запас прочности болта; $[k]=2,5$ — допустимый запас прочности; $\sigma=p/F_1$ — напряжение в болте; F_1 — сечение болта по внутреннему диаметру резьбы, м^2; $p=Q/z$ — сила, действующая на болт.

Прочность на разрыв металлических болтов и гаек должна быть не менее 392 Н/мм^2 (ГОСТ Р 51330.1-99).

Подшипниковые узлы

Для взрывозащищенных электродвигателей применяются, как правило, подшипники качения.

Схемы установки подшипников качения на валу взрывозащищенного электродвигателя должны обеспечивать:

а) восприятие радиальных и осевых нагрузок, действующих на вал;

б) совмещение узла установки подшипника с узлом взрывозащиты в месте сопряжения вал — щит;

в) наименее возможный относительный перекос подшипников для принятого класса точности;

г) исключение возможности смещения или перекоса вала относительно поверхности взрывозащиты и возникновения затиров вращающихся и неподвижиых частей подшипников и вала;

д) исключение влияния на подшипники монтажных деформаций вала.

В последнее время в двигателях применяются упрощенные схемы конструкций подшипниковых узлов с ролико- и шарикоподшипниками. Типичные схемы подшипниковых узлов взрывозащищенных электродвигателей приведены ниже.

Схема I (рис. 11.3). Два радиальных шарикоподшипника; в подшипниковом узле — плоское пружинное кольцо.

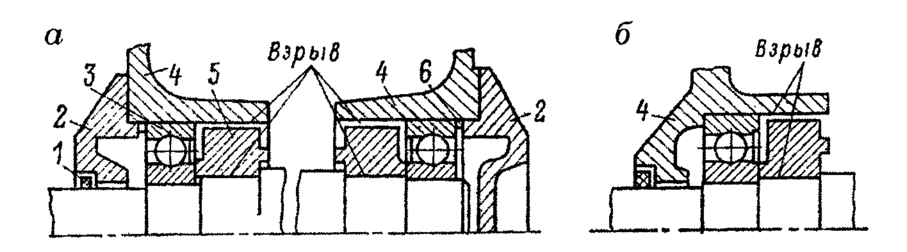


Рис. 11.3. Конструкция подшипникового узла для двигателей мощностью до 10 кВт:

1 — уплотнительное кольцо; *2* — крышка подшипника; *3* — подшипник шариковый; *4* — щит; *5* — взрывозащитное кольцо; *6* — плоское пружинное кольцо

Торцевой зазор между подшипником и щитом (или крышкой подшипника) определяется из принятых допусков сопрягаемых деталей и температурного расширения вала при нагреве двигателя. Подшипниковый щит может быть выполнен либо со сквозной проточкой (рис. 11.3, а), либо заодно с крышкой (рис. 11.3, б). Взрывозащитные сопряжения рекомендуется располагать за подшипником, со стороны полости двигателя, для предотвращения увеличения взрывозащитного зазора вследствие попадания абразивных веществ.

Такая схема подшипникового узла рекомендуется для взрывозащитных электродвигателей общего применения мощностью до 10 кВт. Для таких двигателей рекомендуются подшипники с одной защитной шайбой, предотвращающей попадание консистентной смазки из подшипникового узла в полость двигателя. Посадка подшипника на валу П или Н — по системе отверстия, а в щите — посадка А или С — по системе вала.

Схема II (рис. 11.4, *а*). Цилиндрический роликоподшипник *4* — на стороне привода; радиальный шарикоподшипник *7* — на стороне, обратной приводу.

Посадки подшипников аналогичны схеме I.

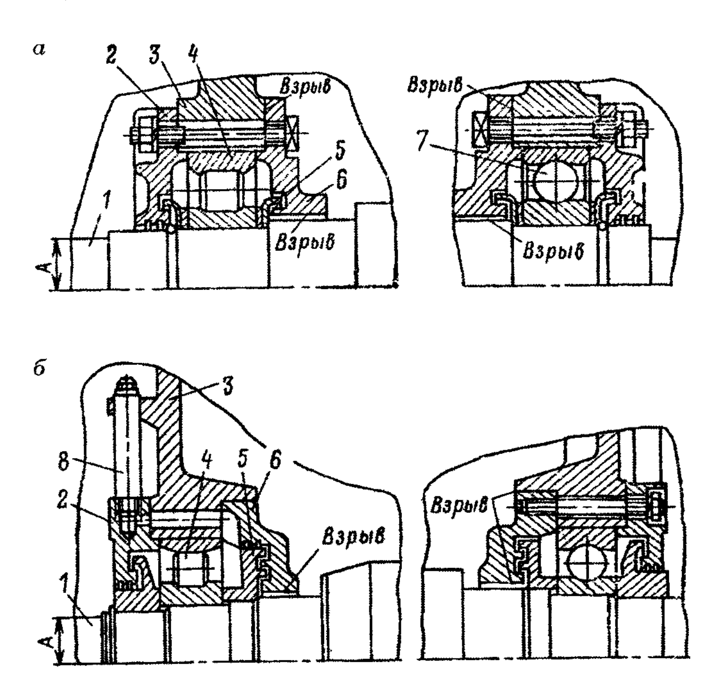


Рис 11.4. Конструкции подшипникового узла для двигателей мощностью 10—400 кВт:

а — с взрывозащитой по плоскости в неподвижном соединении;
б — с взрывозащитой по цилиндру в неподвижном соединении; *1* — вал;
2 — крышка подшипнка наружная; *3* — щит; *4* — подшипник роликовый;
5 — лабиринтное уплотнение; *6* — крышка подшипника внутренняя;
7 — подшипник шариковый; *8* — устройство для пополнения смазки

Подшипниковые крышки — внешняя *2* и внутренняя *6* — необходимы для закрепления подшипника от аксиальных перемещений, для

удержания смазки подшипника от вытекания, а также для защиты смазки от попадания в нее загрязняющих материалов и механических предметов, которые могут повредить подшипник.

Взрывозащитные сопряжения располагаются со стороны полости двигателя. Взрывозащитный зазор в сопряжении щит — крышка получен по плоскому стыку, а в сопряжении вал — крышка — по цилиндрическим поверхностям. Недостатками такой конструкции являются возможные отклонения взрывозащитных зазоров в соединении крышка — щит при попадании в ннх посторонних предметов и невозможность контроля этих зазоров. Аналогичная конструкция, но без этого недостатка представлена на рис. 11.4, *б*. Контроль зазоров ведется косвенным методом, путем замера диаметров сопрягаемых поверхностей. Эта схема подшипникового узла рекомендуется для двигателей мощностью от 10 до 400 кВт.

Пополнение смазки в подшипниковом узле производится через специальные пресс-масленки *8*, удаление отработавшей свой срок смазки — через специальные каналы.

Схема III (рис. 11.5, *а*, *б*). Такая схема применяется для врубово-комбайновых взрывозащищенных электродвигателей. Нагрузки воспринимают шарикоподшипник и роликоподшипник. Подшипниковые узлы имеют усиленные уплотнения от проникания масла из редукторов приводных механизмов.

Резиновые уплотнения, расположенные в подшипниковом узле, обеспечивают сохранение консистентной смазки в подшипниковой камере, а уплотнения *1* типа УМА (манжетиые) со стороны привода в комплексе с гидравлическими уплотнениями, представляющими собой турбинку *2*, играющую роль рабочего колеса насоса, или маслоотбойное кольцо *3* и дренажные отверстия обеспечивают маслозащиту двигателя. Взрывозащитные сопряжения на рисунке обозначены словом «Взрыв» и указаны стрелкой. В местах подвижных взрывозащитных соединений устанавливаются втулки из антифрикционной бронзы. Поверхности, по которым скользят кромки манжетных уплотнений (УМА), должны быть калеными и полированными. Перечисленные

схемы подшипниковых узлов взрывозащищенных электродвигателей являются основными, но не исчерпывают всего возможного разнообразия конструктивных решений.

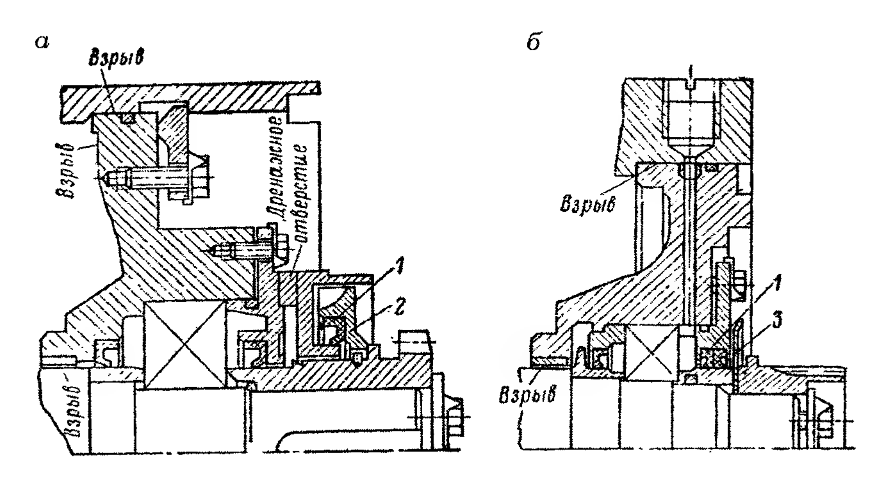


Рис. 11.5. Конструкция подшипнnковых узлов комбайновых электродвигателей:

а — с дренажным отверстием; *б* — с уплотнением; *1* — уплотнение манжетного типа; *2* — гидротурбина; *3* — кольцо маслоотбойное

Для двигателей, работающих в вертикальном положении с расположением рабочего конца вала вниз или вверх или под любым углом к горизонтальной оси, применяются те же схемы подшипниковых узлов, но с установкой радиально-упорных подшипников.

Указания по выбору и расчету подшипников. При выборе типа и размеров шарико- и роликоподшипников учитываются следующие факторы:

а) действующие нагрузки и их направление (радиальная, осевая, комбинированная);

б) характер нагрузки (постоянная, переменная);

в) частота вращения одного из колец подшипника;

г) окружающая среда (температура, влажность, запыленность, кислотность);

д) конструкция подшипникового узла и необходимость самоустанавливаемости подшипника;

е) требуемая долговечность.

Расчетная долговечность подшипников взрывозащищенных электродвигателей мощностью до 100 кВт обычно должна быть не менее 10 000 часов машинного времени.

Выбор подшипников взрывозащищенных электродвигателей проводится в следующем порядке:

а) намечается тип подшипника (шариковый или роликовый, радиальный, радиально-упорный, упорный). При этом учитываются условия работы двигателя и характер нагрузок на подшипники;

б) определяется приведенная расчетная нагрузка $Q_п$;

в) определяется расчетный коэффициент работоспособности C:

$$C = Q_п (n h)^{0,3}, \qquad (11.5)$$

где n — частота вращения кольца подшипника, об/мин; h — требуемый срок службы подшипника, лет;

г) по найденному расчетному коэффициенту работоспособности в каталоге уточняют тип подшипника.

Необходимо как можно точнее определить действующие нагрузки на подшипники, так как из указанной выше формулы можно определить, что при увеличении нагрузки в 2 раза долговечность работы подшипника уменьшается в 8 раз.

Приведенная расчетная нагрузка определяется по следующим формулам:

для радиальных подшипников

$$Q_п = (R k_k + m A) k_б k_т; \qquad (11.6)$$

для радиально-упорных подшипников

$$Q_п=[R k_k+m(A-S)]k_б k_т; \qquad (11.7)$$

для упорных подшипников

$$Q_п=A k_б k_т; \qquad (11.8)$$

где R — радиальная нагрузка, Н; A — осевая нагрузка, Н; S — осевая реакция, возникающая в радиально-упорном подшипнике от радиальной нагрузки, Н; m — коэффициент, учитывающий неодинаковое влияние радиальных и осевых нагрузок на срок службы подшипника (m=1,5 для радиальных однорядных шарикоподшипников); $k_б$ — коэффициент, учитывающий влияние характера нагрузки на срок службы подшипника. Для взрывозащищенных двигателей общего применения его принимают равным $k_б$=1,3÷1,8. Для взрывозащищенных двигателей специализированных шахтных механизмов (конвейеров, толкателей и др.), работающих с частыми толчковыми нагрузками, принимают равным $k_б$=1,8÷2; $k_т$ — коэффициент, учитывающий влияние температурного режима на срок службы подшипника. Для подшипников с рабочей температурой не свыше 100 °С $k_т$=1; $k_к$ — коэффициент, учитывающий зависимость срока службы подшипника от того, какое кольцо вращается (внутреннее или внешнее). Для машин с вращающимся внутренним кольцом $k_к$=1.

Применение консистентной смазки возможно, если скоростной фактор

$$dn \leqslant 300, \qquad (11.9)$$

где d — внутренний диаметр подшипника, м.

В технической литературе также широко применяется вычисление скоростного фактора по среднему диаметру подшипника:

$$d_{ср} = 0{,}5(d+D). \qquad (11.10)$$

Этот критерий более универсален и не зависит от серии подшипников. По этому критерию граница применимости консистентной смазки соответствует

$$d_{ср}\, n \leqslant 450. \qquad (11.11)$$

Узлы взрывозащиты

Взрывозащищенные двигатели с взрывозащитой типа «*d*» снабжаются узлами взрывозащиты. Перед рассмотрением конструкции узлов взрывозащиты приведем основные термины согласно ГОСТ Р 51330.1-99:

— **взрывонепроннцаемая оболочка**: вид взрывозащиты электрооборудования, в котором его части, способные воспламенить взрывоопасиую смесь, заключены в оболочку, способную выдерживать давление взрыва воспламенившейся смеси без повреждения и передачи воспламенения в окружающую взрывоопасную смесь, для которой она предназначена;

— **свободный объем оболочки (отделения)** V: внутренний объем оболочки (отделения) за вычетом объема, занимаемого встроенными элементами;

— **взрывонепроницаемое соединение**: соединение частей оболочки, через щель которого взрыв внутри оболочки не распространяется в окружающую взрывоопасную смесь с установленным коэффициентом безопасности;

— **длина щели** L: кратчайший путь по взрывозащитной поверхности из оболочки в окружающую среду или из одного отделения в другое на участке, где отсутствует отверстие для болта или другого элемеита крепления;

— **ширина щели** S: расстояние между соответствующими поверхностями взрывонепроницаемого соединения. При цилиндрических поверхностях за ширину щели принимают диаметральный зазор (разность диаметров);

— **взрывонепроницаемое отделение оболочки**: отделение, которое образовано при наличии взрывонепроницаемых перегородок внутри оболочки;

— **камера взрывонепроницаемой оболочки**: камера, которая образуется при наличии внутри оболочки перегородок, не обеспечивающих взрывонепроницаемость;

— **взрывозащитная поверхность**: поверхность части оболочки, которая совместно с соответствующей ей поверхностью другой части образует щель взрывонепроницаемого соединения;

— **наружное взрывонепроницаемое соединение**: взрывонепроницаемое соединение, щель которого соединяет внутреннюю часть отделения или оболочки с окружающей средой;

— **внутреннее взрывонепроницаемое соединение**: взрывонепроницаемое соединение, щель которого соединяет одно взрывонепроницаемое отделение с другим;

— **наружная часть оболочки**: часть оболочки, при повреждении которой продукты взрыва могут проникать непосредственно в окружающую среду;

— **внутренняя часть оболочки**: часть оболочки, при повреждении которой продукты взрыва могут проникать из одного взрывонепроницаемого отделения в другое;

— **ширина радиальной щели** S_d: расстояние между поверхностями отверстия и вала в цилиндрическом соединении;

— **длина щели до отверстия** l: кратчайший путь по взрывозащитной поверхности из оболочки в окружающую среду или из одного отделения в другое на участке, где имеется отверстие для болта или другого элемента крепления;

— **параметры взрывонепроницаемого соединения**: значения ширины и длины щели, обеспечивающие взрывонепроницаемость оболочки с установленным коэффициентом безопасности;

— **подвижное соединение частей оболочки**: соединение взрывозащитных поверхностей, у которых хотя бы одна из частей при работающем электрооборудовании находится в постоянном или периодиче-

ском движении (например, соединение вала электродвигателя с подшипниковым щитом, валика управления с втулкой в стенке оболочки);

— **неподвижное соединение частей оболочки**: соединение взрывозащитных поверхностей, части которых при работающем электрооборудовании не находятся в движении (например, соединение крышки с корпусом оболочки);

— **взрывоустойчивость оболочки**: способность оболочки сопротивляться давлению, возникшему при взрыве в ней взрывоопасной смеси, без нарушения средств взрывозащиты;

— **прямой ввод**: ввод кабеля или проводов иепосредственно во взрывонепроницаемую оболочку, в которой смонтировано электротехническое устройство;

— **промежуточный ввод**: ввод кабеля или проводов во вводное взрывонепроницаемое отделение оболочки, разделенное взрывонепроницаемой перегородкой с проходными изоляторами от отделения с электротехническим устройством;

— **изоляционная колодка**: проходной изолятор во взрывонепроницаемой перегородке или стенке взрывонепроницаемой оболочки с более чем одной токопроводящей шпилькой;

— **плоское взрывонепроницаемое соединение**: соединение частей взрывонепроницаемой оболочки, в котором щель образуется между плоскими взрывозащитными поверхностями;

— **цилиндрическое взрывонепроницаемое соединение**: соединение частей взрывонепроницаемой оболочки, в котором щель образуется между цилиндрическими взрывозащитными поверхностями;

— **плоскоцилиндрическое взрывонепроницаемое соединение**: соединение частей взрывонепроницаемой оболочки, в котором щель образуется частично плоскими и частично цилиндрическими взрывозащитными поверхностями;

— **резьбовое взрывонепроницаемое соединение**: соединение частей взрывонепроницаемой оболочки, в котором щель образуется между резьбовыми взрывозащитиыми поверхностями.

Кроме вышеперечисленных взрывонепроницаемых соединений применяются также лабиринтные (рис. 11.6) и зубчатые (рис. 11.7), взрывонепроницаемые соединения.

Параметры всех взрывонепроницаемых соединений должны в отсутствие избыточного давления соответствовать значениям, указанным в таблицах 11.4, 5, 6, 7, 8 (ГОСТ Р 51330.1-99).

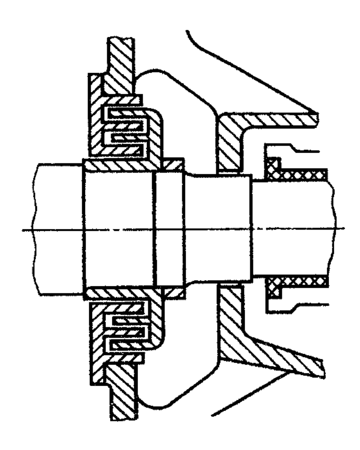


Рис. 11.6. Пример лабиринтного соединения для электрических машин

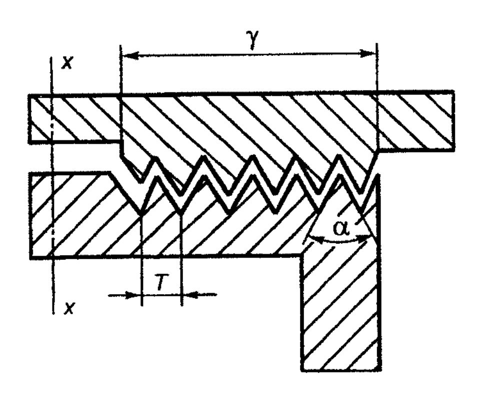


Рис. 11.7. Пример зубчатого соединения

Взрывозащитные поверхности взрывонепроницаемых соединений должны иметь защиту от коррозии, например, с помощью консистентной смазки, гальванического покрытия или химической обработки. Покрытие взрывозащитных поверхностей краской или лаком недопустимо.

Нерезьбовые соединения

Длина соединений

Длина соединений не должна быть меньше минимальных значений, приведенных в таблицах 11.4, 11.5, 11.6, 11.7.

Таблица 11.4

Параметры взрывонепроницаемых соедииений оболочек электрооборудованния группы I

Вид взрывоиепроницаемого соедииения	Длина щели L, мм	Максимальиая ширина щели, мм, для объема оболочки	
		$V \leqslant 100$ см^3	$V > 100$ см^3
Плоские и цилиндрические соединения	$6,0 \leqslant L < 12,5$	0,30	—
	$12,5 \leqslant L < 25,0$	0,40	0,40
	$25,0 \leqslant L$	0,50	0,50
Тяги управления и валики	$6,0 \leqslant L < 12,5$	0,30	--
	$12,5 \leqslant L < 25,0$	0,40	0,40
	$25,0 \leqslant L$	0,50	0,50
Валы с подшипниками скольжения	$6,0 \leqslant L < 12,5$	0,30	—
	$12,5 \leqslant L < 25,0$	0,40	0,40
	$25,0 \leqslant L < 40,0$	0,50	0,50
	$40,0 \leqslant L$	0,60	0,60
Валы с подшипннками качения	$6,0 \leqslant L < 12,5$	0,45	—
	$12,5 \leqslant L < 25,0$	0,60	0,60
	$25,0 \leqslant L$	0,75	0,75

Таблица 11.5

Параметры взрывонепроницаемых соединений оболочек электрооборудования подгруппы II А

Вид взрывонепроницаемого соединения	Длина щели L, мм	Максимальная ширина щели, мм, для объема оболочки		
		$V \leqslant 100$ см^3	$100 < V \leqslant 2000$ см^3	$V > 2000$ см^3
Плоские и цилиндрические соединения	$6{,}0 \leqslant L < 12{,}5$	0,30	—	—
	$12{,}5 \leqslant L < 25{,}0$		0,30	0,20
	$25{,}0 \leqslant L$	0,40	0,40	0,40
Тяги управления и валики	$6{,}0 \leqslant L < 12{,}5$	0,30	—	—
	$12{,}5 \leqslant L < 25{,}0$		0,30	0,20
	$25{,}0 \leqslant L$	0,40	0,40	0,40
Валы с подшипниками скольжения	$6{,}0 \leqslant L < 12{,}5$	0,30	—	—
	$12{,}5 \leqslant L < 25{,}0$	0,40	0,40	0,40
	$25{,}0 \leqslant L < 40{,}0$	0,35	0,30	0,20
	$40{,}0 \leqslant L$	0,50	0,50	0,50
Валы с подшипниками качения	$6{,}0 \leqslant L < 12{,}5$	0,45	—	—
	$12{,}5 \leqslant L < 25{,}0$	0,50	0,45	0,30
	$25{,}0 \leqslant L < 40{,}0$	0,60	0,60	0,60
	$40{,}0 \leqslant L$	0,75	0,75	0,75

Таблица 11.6

Параметры взрывонепроницаемых соединений оболочек электрооборудования подгруппы II В

Вид взрывонепроницаемого соединения	Длина щели L, мм	Максимальная ширина щели, мм, для объема оболочки		
		$V \leqslant 100$ см^3	$100 < V \leqslant 2000$ см^3	$V > 2000$ см^3
Плоские и цилиндрические соединения	$6{,}0 \leqslant L < 12{,}5$	0,20	—	—
	$12{,}5 \leqslant L < 25{,}0$		0,20	0,15
	$25{,}0 \leqslant L$			0,20
Тяги управления и валики	$6{,}0 \leqslant L < 12{,}5$		—	—
	$12{,}5 \leqslant L < 25{,}0$		0,20	0,15
	$25{,}0 \leqslant L$			0,20
Валы с подшипниками скольжения	$6{,}0 \leqslant L < 12{,}5$		—	—
	$12{,}5 \leqslant L < 25{,}0$	0,25	0,20	0,15
	$25{,}0 \leqslant L < 40{,}0$	0,30	0,25	0,20
	$40{,}0 \leqslant L$	0,40	0,30	0,25
Валы с подшипниками качения	$6{,}0 \leqslant L < 12{,}5$	0,30	—	—
	$12{,}5 \leqslant L < 25{,}0$	0,40	0,30	0,20
	$25{,}0 \leqslant L < 40{,}0$	0,45	0,40	0,30
	$40{,}0 \leqslant L$	0,60	0,45	0,40

Таблица 11.7

Параметры взрывонепроницаемых соединений оболочек электрооборудования подгруппы II C

Вид взрывонепроницаемого соединения	Длина щели L, мм	Максимальная ширина щели, мм, для объема оболочки			
		$V \leqslant 100$ см³	$100 < V \leqslant 500$ см³	$500 < V \leqslant 2000$ см³	$V > 2000$ см³
Плоские[1]	$6{,}0 \leqslant L < 9{,}5$	0,10	—	—	—
	$9{,}0 \leqslant L$		0,10	—	—
Цилиндрические (рис. 11-10, 11, 12)	$6{,}0 \leqslant L < 12{,}5$	0,10	0,10	—	—
	$12{,}5 \leqslant L < 25{,}0$	0,15	0,15	0,15	—
	$25{,}0 \leqslant L < 40{,}0$				0,15
	$40{,}0 \leqslant L$	0,20	0,20	0,20	0,20
Плоскоцилиндрические[2] (рис. 11.9) $C \geqslant 6$ мм, $d \geqslant 0{,}5L$, $L = C + d$; $f \leqslant 1$ мм	$12{,}5 \leqslant L < 25{,}0$	0,15	0,15	0,15	—
	$25{,}0 \leqslant L < 40{,}0$	0,18	0,18	0,18	0,18
	$40{,}0 \leqslant L$	0,20	0,20	0,20	0,20
Тяги управления и валики	$6{,}0 \leqslant L < 9{,}5$	0,10	—	—	—
	$9{,}5 \leqslant L < 12{,}5$		0,10	—	—
	$12{,}5 \leqslant L < 25{,}0$	0,15	0,15	0,15	—
	$25{,}0 \leqslant L < 40{,}0$				0,15
	$40{,}0 \leqslant L$	0,20	0,20	0.20	0.20
Валы с подшипниками качения	$6{,}0 \leqslant L < 9{,}5$	0,15	—	—	—
	$9{,}5 \leqslant L < 12{,}5$		0,15	—	—
	$12{,}5 \leqslant L < 25{,}0$	0,25	0,25	0,25	—
	$25{,}0 \leqslant L < 40{,}0$				0,25
	$40{,}0 \leqslant L$	0,30	0,30	0,30	0,30

1) Для взрывоопасных смесей ацетилена с воздухом плоские соединения не допускаются.

2) Если размер фаски $f \leqslant 0{,}5$ мм, то вместо 0,18 и 0,20 допускается принимать соответственно 0,20 и 0,25 мм

Таблица 11.8

Параметры взрывонепроницаемых резьбовых соединений

Шаг резьбы	≥ 0,7
Число полных неповрежденных непрерывных ниток резьбы	≥ 5
Осевая длина резьбы, мм, для оболочек объемом:	
$V \leqslant 100$ см³	≥ 5
$V > 100$ см³	≥ 8
Качество резьбы	Среднее и хорошее

Шероховатость поверхности

Взрывозащитные поверхности должны быть обработаны так, чтобы средняя шероховатость R_a не превышала 6,3 мкм по ГОСТ 25142.

Ширина щели

В плоских взрывонепроннцаемых соединениях не допускается преднамеренно увеличивать ширину щели, за исключением быстрооткрываемых крышек.

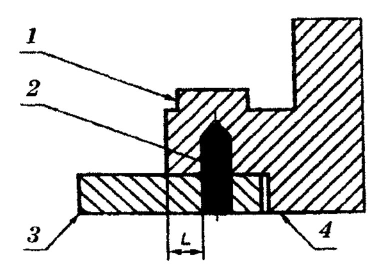


Рис. 11.8. Взрывонепроницаемая щель плоского соединения:
1 — взрывонепроницаемая оболочка; *2* — цилиндрический штифт; *3* — крышка; *L* — длина взрывонепроницаемого соединеиия; *4* — поверхность крышки (штифта) должна быть в одной плоскости

Ширина щели, если таковая имеется между поверхностями соединения, не должна превышать максимальных значений, приведенных в таблицах 11.4, 11.5, 11.6, 11.7.

В электрооборудовании группы I должна быть предусмотрена возможность прямого или косвенного контроля ширины щели плоских соединений крышек, предназначенных для периодического открывания (см. рис. 11.8).

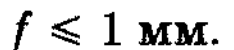
Цилиндрические и плоскоцилиндрические соединения

Длина плоскоцилиндрического соединения должна удовлетворять следующим требованиям (см. рис. 11.9).

$$L = c + d$$

$c \geqslant 6$ мм (только для злектрооборудования подгруппы IIC);

$d \geqslant 0{,}5L$ (только для электрооборудования подгруппы IIC);



$f \leqslant 1$ мм.

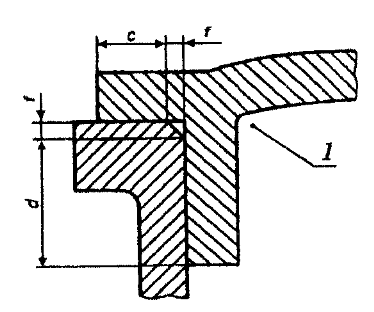


Рис. 11.9. Плоскоцилиндрическое взрывонепроницаемое соединение: $L = c + d$; $c \geqslant 6$ мм; $d \geqslant 0{,}5L$; $f \leqslant 1$ мм для оборудоваиия подгруппы IIC

Длина цилиндрического соединения (см. рис. 11.10) должна удовлетворять следующим требованиям:

— для электрооборудоваиия группы I и подгрупп IIA и IIB плоская часть может не выполнять требования к взрывонепроницаемому соединению;

— для электрооборудования подгруппы IIC ширина щели плоской части ие должна превышать значений, приведенных в таблице 11.7 для цилиндрической части соединения.

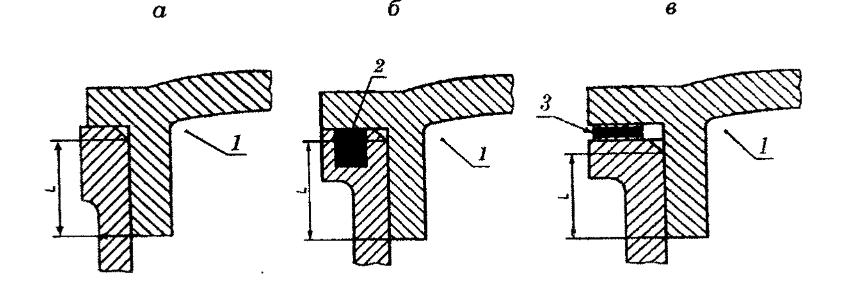


Рис. 11.10. Цилиндрические взрывонепроницаемые соединения:
1 — внутренняя часть оболочки; *2* — только для подгруппы IIC; *3* — металлическая или покрытая металлом упругая прокладка

Если в плоской части соединения установлена прокладка (см. рис. 11.10, *б*), то ширина щели плоской части соединения должна измеряться после уплотнения прокладки, минимальная длина цилиндрической части должна поддерживаться до и после уплотнения прокладки. Если металлическую или покрытую металлом уплотняющую прокладку применяют для электрооборудования подгруппы IIC (см. рис. 11.10, *в*), то ширина щели между каждой поверхностью плоской части и уплотняющей прокладкой должна быть измерена после уплотнения.

Плоские соединения для подгруппы IIC

Плоские соединения для электрооборудования подгруппы IIC, предназначенного для эксплуатации во взрывоопасной среде, содержащей ацетилен, допускаются только при выполнении условий сноски 2 к таблице 11.7.

Примечание. Соответствующими мерами для предотвращеиия воспламенения окружающей среды вследствие выброса через взрывонепроницаемое соединение внутренних отложений, частиц и пыли, в частности отложений углерода, которые могут образовываться от неполного сгорания ацетилена, являются, напри-

мер, нетеряющиеся прокладки, плоскоцилиндрические или лабиринтные соединения, отражатели или экраны.

Отверстия во взрывонепроницаемых соединениях

Если поверхность соединения прерывается отверстиями для крепежных болтов или шпилек, то минимальная длина щели до отверстия l, как показано на рисунке 11.11, должна быть равна или более:

6 мм при длине щели $L < 12{,}5$ мм;

8 мм при длине щели 12,5 мм $\leqslant L < 25{,}0$ мм;

9 мм при длине щели $L \geqslant 25{,}0$ мм.

Плоские соединения

Длина щели до отверстия l должна измеряться между каждым отверстием и внутренней частью оболочки, если отверстия расположены снаружи оболочки, и между каждым отверстием и наружной частью оболочки, если отверстия расположены внутри оболочки (см. рис. 11.11).

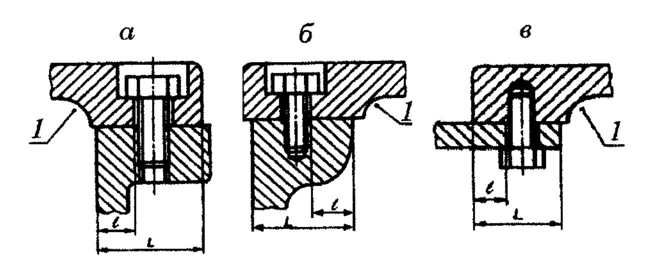


Рис. 11.11. Отверстия под крепежные элементы во взрывонепроницаемых соединениях:

1 — внутренняя часть оболочки; ℓ — длина щели до отверстия; L — длина щели

Плоскоцилиндрические соединения

Длина щели до отверстия ℓ является суммой длин цилиндрической a и плоской b частей соединения, если размер фаски $f \leqslant 1$ мм и $L \leqslant 20$ мм для электрооборудования группы I и подгруппы IIA, $L \leqslant 15$ —

для подгруппы IIВ или $L \leqslant 10$ – для подгруппы IIС (см. рис. 11.12). Если одно из этих условий не выполняется, то длина щели до отверстия ℓ должна измеряться только в части b плоскоцилиндрического соединения.

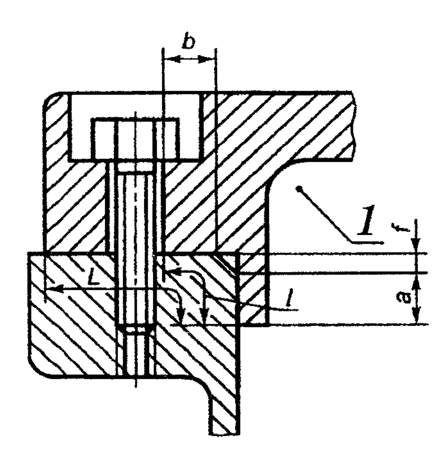


Рис. 11.12. Плоскоцилиндрическое взрывонепроницаемое соединение:
1 — внутренняя часть оболочки

Резьбовые соединения

В оболочках электрооборудования группы I и подгрупп IIА и IIВ резьбовые вэрывонепроницаемые соединения должны иметь минимум пять полных неповрежденных ниток резьбы и осевую длину резьбы 8 мм для оболочек объема $V > 100$ см^3 и 5 мм – для $V \leqslant 100$ см^3.

Для оболочек подгруппы IIС параметры резьбовых соединений должны соответствовать таблице 11.8.

Примечание. Это требование может быть применено также для оболочек электрооборудования группы I и подгрупп IIА и IIВ.

Крышки и части оболочек, установленные на резьбе, должны быть предохранены от самоотвинчивания. Их снятие должно быть возможно только с помощью инструмента.

Уплотнительные прокладки и О-образные кольца

Если применяют прокладку из эластичного материала (например, для защиты от доступа влаги или пыли, или утечки жидкости), то она должна применяться как дополнение к взрывонепроницаемому соединению, но не должна включаться в него (см. рис. 11.13). Это требование не применяют к уплотнению ввода проводов или кабелей.

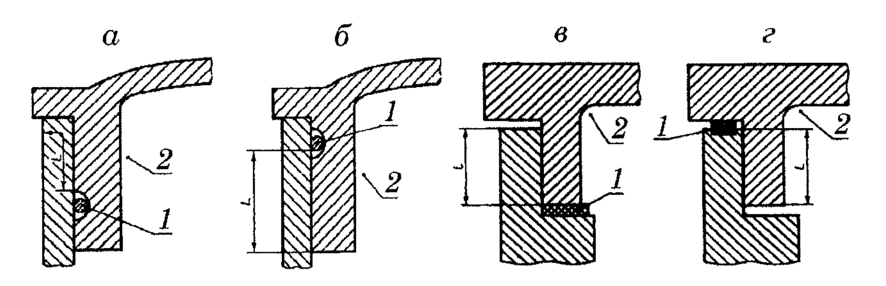


Рис. 11.13. Прокладки из эластичного материала во взрывонепроницаемых соединениях:

1 — прокладка; *2* — внутренняя часть оболочки; *L* — длина взрывонепроницаемого соединения по таблицам 11.4—11.7

Конструкция уплотнения должна быть такой, чтобы при сборке оболочки прокладки не мешали установить требуемую настоящим стандартом длину и ширину взрывонепроницаемых соединений.

Для электрооборудования группы I прокладки должны быть нетеряющимися, например, установлены на клею.

В соединениях частей оболочки, которые при эксплуатации электрооборудования редко разбираются, и в соединениях светопропускающих частей могут применяться металлические прокладки или прокладки из негорючего материала с металлической обшивкой. Такая прокладка способствует защите от взрыва и включается во взрывонепроницаемое соединение.

Герметизированные соединения

Там, где применяют компаунд или другие материалы (герметики), конструкция должна быть такой, чтобы механическая прочность оболочки не зависела от компаунда или герметизирующего материала.

Наикратчайший путь через герметизированное соединение изнутри наружу взрывонепроницаемой оболочки объема V должен быть:

$$\geqslant 3 \text{ мм, если } V \leqslant 10 \text{ см}^3;$$

$$\geqslant 6 \text{ мм, если } 10 \text{ см}^3 \leqslant V \leqslant 100 \text{ см}^3;$$

$$\geqslant 10 \text{ мм, если } V > 100 \text{ см}^3.$$

Взрывонепроницаемые соединения вращающихся электрических машин должны быть сконструированы так, чтобы не подвергаться износу при нормальной эксплуатации.

Взрывонепроницаемое соединение может быть: цилиндрическим (см. рис. 11.14), лабиринтным (см. рис. 11.6) или с плавающими втулками (см. рис. 11.15).

Ширина радиальной щели во взрывонепроницаемом соединении вала с подшипниковым щитом должна быть не менее 0,075 мм для электрооборудования группы I и подгрупп IIA и IIB и 0,05 мм – для подгруппы IIC.

Подшипники качения

В электрических машинах с подшипниками качения максимальная ширина радиальной щели во взрывонепроницаемом соединении вала с подшипниковым щитом за счет эксцентричности вала должна быть не более двух третьих максимальной ширины щели, установленной в таблицах 11.4—11.7.

Ширина маслоулавливающих канавок и промежутки между ними не должны включаться в значение длины щели взрывонепроницаемого соединения. Непрерываемая длина соединения должна быть не менее значений, приведенных в таблицах 11.4—11.7 (см. рис. 11.14, 15).

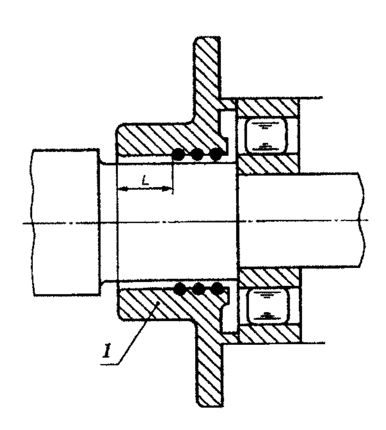


Рис. 11.14. Пример взрывонепроницаемогосоединения вала с подшипниковым щитом для электрических машин с подшипниками качения:
1 — подшипниковый щит; L — длина соединения (см. таблицы 11.4—11.7)

Примечание. Для степени плавучести, обеспеченной в конструкции, должен приниматься в расчет воздушный промежуток между статором и ротором и допустимый износ в подшипниках

Ширина диаметральной щели между валом и подшипниковым щитом не должна превышать соответствующее значение, приведенное в таблицах 11.4—11.7, но быть не менее 0,1 мм.

Вентиляционные устройства

Для взрывозащищенных электродвигателей должны применяться вентиляторы наружного обдува, выполненные из материала, не являющегося источником искр и чрезмерного нагрева при возможных соударениях с металлическими частями или другими деталями из любого материала, которые могут попасть в зону вращения вентилятора.

Правилами рекомендуется и в последние годы нашел широкое применение цинковый сплав марки ЦАМ 4-1, который соответствует указанным требованиям.

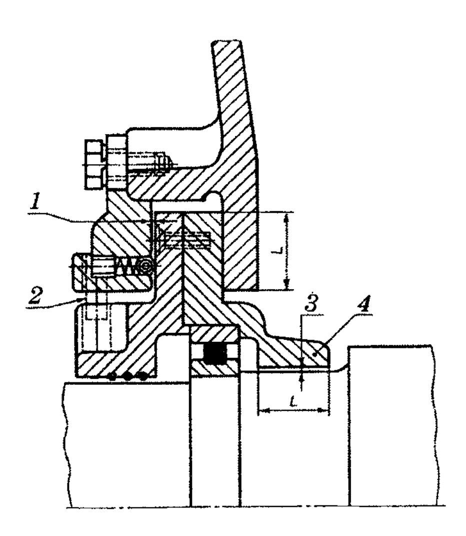


Рис. 11.15. Соединение с плавающими втулками:
1 — максимальная ширина щели, соответствующая требованиям таблиц 11.4—11.7;
2 — стопор, препятствующий вращению подшипникового щита; *L* — длина соединеиия по таблицам 11.4—11.7; *3* — ширина щели (см. таблицы 11.4—11.7);
4 — подшипниковый щит; является свободным, опускается с валом, но остается концентрическим

Вентиляторы для двигателей мощностью до 10 кВт, выполненные из сплава ЦАМ 4-1, могут устанавливаться на вал двигателя так, как указано на рисунке 11.16, а вентиляторы для двигателей мощностью свыше 10 кВт, а также для всех двигателей, предназначенных для работы в режиме частых пусков или реверсов, выполненные из сплава ЦАМ 4-1, должны иметь ступицу со втулкой из стали или чугуна (рис. 11.16, б), исключающую разбиение шпоночного соединения.

При выполнении вентиляторов из пластмасс должны быть приняты меры, исключающие появление на поверхности вентилятора зарядов статического электричества, так как их появление может привести к появлению искр, которые могут воспламенить окружающую взрывоопасную среду. Рекомендуется производить покрытие таких вентиляторов токопроводящими эмалями или выполнять вентилятор

с экраном, впрессованным в пластмассу с заземлением через вал. Экран должен выходить за вентилятор в наиболее удаленных от центра точках, в которых может появляться максимальное скопление зарядов статического электричества. Кожухи вентиляторов должны быть прочными, исключающими пробивание при возможных ударах, особенно для двигателей, предназначенных для работы в подземных условиях. При изготовлении кожухов, штампованных из стали, рекомендуется следующая толщина стенок:

для двигателей мощностью до 4 кВт............................2 мм
для двигателей мощностью до 40 кВт..........................3 мм
для двигателей мощностью до 320 кВт........................5 мм
для двигателей мощностью до 2000 кВт......................5—6 мм

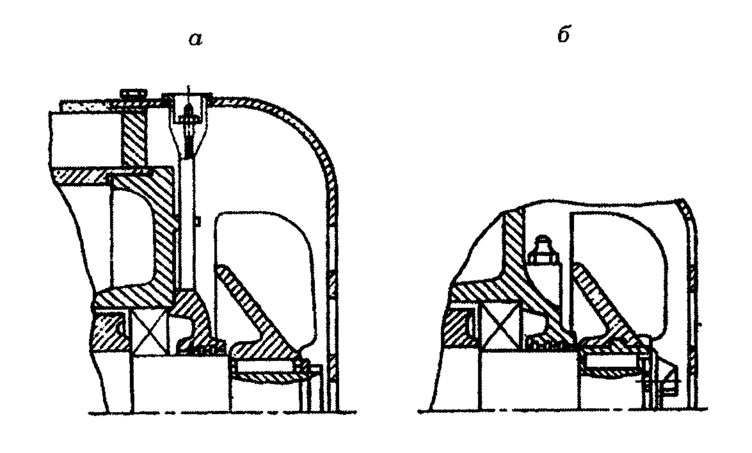


Рис. 11.16. Крепление вентилятора на валу:
а — с помощью шпонки и пружинного кольца;
б — с помощью шпонки и запорной шайбы

Однако часто в двигателях (у большинства зарубежных фирм) кожух вентилятора выполнен литой из чугуна или легкого сплава. Такое выполнение исключает прогибание кожуха, но сам кожух менее прочен, чем стальной.

Крепление кожуха на двигателе должно исключать сдвигание его вдоль оси двигателя при возможных ударах по кожуху. Для этого торец кожуха (см. рис. 11.16) или другая ее часть должны иметь упор в неподвижные части станины или щита.

Кожух вентилятора должен быть выполнен со степенью защиты IP20, т. е. должен иметь сетку для прохода воздуха с размерами отверстий не более 12 мм. Такое исполнение исключает возможные соприкосновения человека с вращающимися частями вентилятора.

Коробка выводов

Для подключения к питающей сети двигателей на корпусе статора должна быть коробка выводов с контактными устройствами (рис. 11.17).

Конструкция коробки выводов может быть различной в зависимости от мощности двигателя, питающего напряжения и условий его работы.

Коробки выводов состоят из ряда отдельных элементов, конструктивное выполнение которых может быть различно: оболочки коробки выводов, в которой расположены контактные устройства; системы контактных зажимов, предназначенных для закрепления проводов или жил подводимого кабеля и выводных проводов от обмотки статора; кабельного ввода, служащего для прокладки и уплотнения кабеля или проводов при вводе их в коробку выводов.

К коробкам выводов взрывозащищенных электродвигателей предъявляется ряд требований.

1. Места подсоединения жил кабеля или проводов к контактным зажимам должны быть доступны для монтажа, периодических осмотров и ремонтов в процессе эксплуатации электродвигателей.

2. Коробки выводов должны допускать возможность поворота их в необходимом положении, удобном для ввода кабелей и проводов.

3. Коробки выводов должны допускать ввод бронированных кабелей с бумажной, резиновой и пластмассовой изоляцией, гибких резиновых кабелей, а также проводов, проложенных в стальных трубах.

Рис. 11.17. Коробка выводов двигателей АИММ160, 180, 200 с тремя силовыми проходными зажимами

При этом должна быть обеспечена возможность заделки кабеля с бумажной изоляцией — как сухая, так и с заливкой кабельной массой. В электродвигателях мощностью до 20 кВт коробки выводов рассчитывают на ввод бронированного кабеля с бумажной изоляцией без заливки кабельной массой.

4. Внутренние разделы коробки выводов должны быть рассчитаны так, чтобы свободно размещался участок жил кабеля или выводов и исключалась возможность их пересечения между собой и касания ими заземленных частей коробки.

5. Полость коробки выводов должна быть отделена от полости двигателя взрывонепроницаемой перегородкой, а присоединение жил кабелей или проводов к обмотке статора должно осуществляться посредством взрывонепроницаемых проходных зажимов. Это вызвано тем, что кабельный ввод, в котором уплотнение кабеля или проводов осуществляется с помощью резинового кольца, не обладает такой же степенью надежности в отношении взрывонепроницаемости, как , например, щелевое взрывонепроницаемое соединение металлических частей оболочки. Кроме того, в процессе эксплуатации взрывонепроницаемость кабельного ввода может быть нарушена вследствие старения резины или некачественного монтажа. Поэтому если полость коробки выводов не будет отделена от полости электродвигателя с нормально искрящимися или греющимися до высокой температуры элементами, то при нарушении уплотнения кабелей или проводов и проникновении смеси внутрь такой оболочки возможен взрыв с передачей его в окружающую взрывоопасную среду.

Детали коробки выводов взрывозащищенных электродвигателей должны выполняться из материала, по прочности не уступающего материалу основной оболочки двигателя.

У двигателей, предназначенных для работы в подземных выработках, оболочка коробки выводов должна изготовляться из стали или высокопрочного чугуна ВЧ 40-12. Для оболочек со свободным объемом не свыше 2,5 л допускается применение серого чугуна СЧ 15-32. Для оболочек коробки выводов двигателей, предназначенных для работы

иа стационарных установках, независимо от их объема допускается применение серого чугуиа СЧ 15-32.

Толщина стенок оболочки принимается в зависимости от выбранного материала: для стали — ие менее 4 мм, а для чугуна — не менее 6 мм.

Жесткость оболочки может быть достигнута установкой ребер, толщина и высота которых определяется исходя из расчетных, конструктивных и технологических соображений.

Внутренняя форма и размеры корпуса коробки выводов зависят от габаритов монтажных проемов, предназначенных для доступа к контактиой системе.

Коробку выводов крепят к патрубку станины болтами, при этом взрывозащита достигается за счет взрывонепроницаемых зазоров.

Крышка коробки выводов соединяется с корпусом двигателя при помощи невыпадающих болтов, которые обеспечивают надежное соединеиие. Взрывозащита в соединении крышка — корпус обеспечивается взрывонепроницаемыми зазорами, а защита от проиикновения пыли и влаги — различными уплотняющими прокладками.

Система контактных зажимов

В коробках выводов взрывозащищенных злектродвигателей для подключения к виешней сети устанавливается контактная система, предназначенная для соединения сети с обмоткой статора.

Коиструкция контактной системы должна быть такой, чтобы ток проходил кратчайшим путем от токоведущей жилы кабеля к выводному проводу от обмотки статора. Электрический контакт не должен ухудшаться под действием нагрева, вибрации, тряски и т. п.

Проходные шпильки рекомендуется изготовлять из латуни или меди, проходные изоляторы — из дугостойкой пластмассы или керамики.

Выбор диаметров токоведущих проходных шпилек для коробок выводов в зависимости от номинального тока можно производить по таблице 11.9.

В полости коробки выводов расположены также зажимы для внутреннего заземления, изготовленные из латуни, защищенные от коррозии.

Коробки выводов должны иметь также наружный заземляющий зажим для присоединения брони кабеля. Наружные заземляющие зажимы допускается изготавливать из стали с антикоррозионным покрытием. Заземляющие зажимы должны устанавливаться, как правило, на выступающих площадках, зачищенных до блеска.

Таблица 11.9

Проходные шпильки

Размеры шпильки с резьбой	Допустимый ток, А	
	Шпилька медная	Шпилька латунная
М6	48	40
М8	100	90
М10	200	180
М12	500	—
М16	600	—

Если в двигателе установлены температурные датчики тепловой защиты, то проходные зажимы для подсоединения выводных проводов от датчиков располагаются также в полости коробки выводов. При этом силовые зажимы должны быть отделены от зажимов датчиков заземленной металлической перегородкой, чтобы исключалась возможность попадания высокого напряжения в цепь защиты, имеющей низкое напряжение. Большое значение имеет взаимное расположение проходных контактов зажимов и зажимов заземления внутри корпуса коробки выводов. Расстояние между зажимами, а также зажимами и стенками корпусов должно быть достаточно большим для подсоединения провода или жилы кабелей с избыточной длиной, с тем чтобы излишняя длина их могла быть удобно размещена без повреждения изоляции. Зажимы размещают относительно отверстия для вывода кабелей или проводов так, чтобы изгиб кабеля или провода был минималь-

ным. Пример расположеиия проходных зажимов в полости коробки выводов приведеи на рисунке 11.2.

Кабельные вводы предназначены для ввода кабеля или проводов в полость коробки выводов. Кабельиые вводы (муфта или гайка) изготовляются из чугуна СЧ 15-32 для двигателей, предназначенных для установки в помещениях и наружных установках, и из стали или высокопрочного чугуна ВЧ 40-12 для двигателей, предназначенных для работы в подземных выработках.

Основные размеры кабельиого ввода рекомендуется выбирать по данным таблицы 11.10 и рис. 11.18, а, б.

Таблица 11.10

Расчет кабельных вводов

Показатели	Расчетная формула и исходные данные
Максимальный диаметр вводимого кабеля dк*	Справочные данные
Диаметр проходиого отверстия d_o	$d_o = d$к + (1÷2), мм
Диаметр расточки Dр	Dр = 1,6d_o + (1÷2), мм
Наружиый диаметр уплотиительиого кольца Dк	Dк = 1,6d_o, мм
Внутренний диаметр кольца d	$d = 0{,}6d_o$ мм
Высота кольца h	$h = 0{,}6d_o$, но не менее 20 мм

* Максимальный диаметр вводимого кабеля dк включает допуск +10 % согласно соответствующему ГОСТу на его изготовление.

Проходное отверстие d_o необходимо проверять на возможность прохода кабеля с наконечниками. При расчете кабельного ввода, предназначенного для ввода проводов (рис. 11.18, б), диаметр проходного отверстия рекомендуется определять по формуле

$$d_0 = d_1 + (1 \div 2),$$

где d_1 — условный диаметр окружности, описанной вокруг отверстия для проводов, причем толщина тела резины между этими отверстиями принимается равной диаметру вводимого провода, но не менее 3 мм.

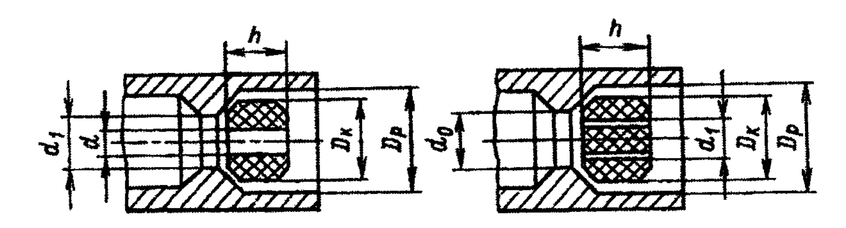


Рис. 11.18. Кабельные вводы:
а — для ввода кабеля; *б* — для ввода проводов

Для обеспечения взрывонепроницаемости неиспользованных кабельных вводов должны быть предусмотрены специальные заглушки, например грибовидной формы, изготовленные из листовой стали толщиной не менее 2—3 мм или капрона толщиной не менее 4 мм при диаметре проходного отверстия до 40 мм и не менее 6 мм при диаметре проходного отверстия более 40 мм. Длиина цилиндрической части заглушки должна быть не менее $0{,}7d$. Цилиндрическая часть капроновой заглушки должна быть сплошной.

Сечение жил кабеля (провода), вводимого в коробку выводов, выбирают по допустимым длительным токовым нагрузкам в соответствии с требованиями ПУЭ. В случае, если номинальные токи отличны от приведеиных ПУЭ, то следует принимать ближайшее большее значение. При этом минимальиое значение сечений должно быть для проводов и кабелей с медиыми жилами 1,5 мм^2, а с алюминиевыми — 2,5 мм^2.

Согласно ПУЭ провода и кабели с резиновый, поливинилхлоридной или бумажной изоляцией, вводимые в коробку выводов двигателей иа напряжение до 1000 В, должны быть рассчитаны на допустимую нагрузку не менее 125 % номинального тока двигателя.

Надежная работа взрывозащищенных электродвигателей в условиях эксплуатации зависит не только от надежности коробки выводов, но и от кабельных вводов. Плохое закрепление кабеля с резкими изгибами в коробке, может быть причиной механических повреждений ка-

беля в этом месте, что в свою очередь может привести к нарушеиию взрывозащиты.

Взрывонепроницаемость в месте ввода кабеля в коробку выводов достигается в основном двумя способами: путем уплотнения кабеля и путем заливки кабеля компаундной массой. Уплотнение кабеля основано на применении эластичного кольца, находящегося в кабельном вводе. При сжатии такого кольца при помощи муфты достигается его герметичное прилегание к стенкам расточки и поверхности кабеля. Существенными недостатками такого уплотнения является старение резины с течением времени, потеря упругости и появление трещин. Обычно коробка выводов электродвигателя рассчитывается на возможность ввода кабеля нескольких сечений, поэтому в уплотняющем кольце предусмотрены надрезы, облегчающие подгонку отверстия по диаметру присоединяемого кабеля.

Кабель во избежание выдергивания его должен быть надежно закреплен в месте ввода. Для этой цели устаиавливается специальная скоба на кабельной муфте.

Для ввода кабеля или проводов в трубах рекомендуются кабельные вводы, имеющие кабельные муфты с трубной резьбой.

Кроме уплотнения кабеля и проводов при помощи резиновых колец применяется еще уплотнение места ввода кабеля путем заливки его кабельной массой, которое создает не только герметичность в месте ввода кабеля, но и предохраняет бронированный кабель с бумажиой изоляцией жил от проникновеиия в него влаги и от вытекания пропиточной кабельной мастики.

В связи с тем, что иа большинстве взрывозащищенных электродвигателей применяются универсальные кабельные вводы, позволяющие подсоединение как гибкого, так и бронированного кабеля, предусматривают такое исполнение коробки выводов, к которым имеются и резиновое уплотнительное кольцо и место для заливки кабельной массы.

Уплотнение кабеля или проводов при помощи заливки кабельной массой обычно рекомендуется для электродвигателей, устанавливае-

мых стационарно, так как отсоединение их от сети производится весьма редко.

Максимальное сечение жилы кабеля, вводимого в один кабельный ввод, рекомендуется не более 120 мм^2, а в случае необходимости применения кабеля с большим сечением жилы следует увеличивать число кабельных вводов и производить ввод несколькими параллельными кабелями.

В коробках выводов, имеющих несколько кабельных вводов, неиспользованные вводы должны быть герметически закрыты заглушками.

Маркировка взрывозащиты электрооборудования

Приведенная ниже система маркировки должна применяться только в электрооборудовании, отвечающем требованиям стандартов на взрывозащиту конкретных видов, перечисленную в ГОСТ Р 51330.0-99.

Маркировка взрывозащиты электрооборудования должна выполняться рельефными знаками в удобном месте оболочки электрооборудования или на табличке, прикрепляемой к оболочке таким образом, чтобы была обеспечена сохранность ее в течение всего срока службы электрооборудования в условиях, для которых оно предназначено.

Все данные маркировки могут быть выполнены на одной или нескольких табличках.

Маркировка взрывозащиты электрооборудования группы II должна выполняться в виде цельного, неразделенного на части обозначения.

Маркировка взрывозащиты рудничного электрооборудования группы I должна состоять из двух частей. В первой части указывают уровень взрывозащиты, во второй части, располагаемой правее или ниже первой, — остальную часть маркировки.

Например, РВ РО или РВ ExdibI, РО ExiasI.
ExdibI ExiasI

Маркировка должна включать:

А. Наименование изготовителя или его зарегистрированный товарный знак.

В. Обозначение типа электрооборудования.

С. Знак Ех, указывающий, что электрооборудование соответствует стандартам на взрывозащиту конкретного вида.

Маркировка электрооборудования группы I должна содержать обозначение уровня взрывозащиты:

РП — для электрооборудования повышенной надежности против взрыва;

РВ — для взрывобезопасного электрооборудования;

РО — для особовзрывобезопасного электрооборудования.

Маркировка взрывозащиты электрооборудования группы II должны содержать перед знаком Ех знак уровня взрывозащиты:

2 — для электрооборудования повышенной надежности против взрыва;

1 — для взрывобезопасного электрооборудования;

0 — для особовзрывобезопасного электрооборудования.

D. Обозначеиие вида взрывозащиты:

o — масленое заполнение оболочки;

p — заполнение или продувка оболочки под избыточным давлением;

q — кварцевое заполнение оболочки;

d — взрывоиепроницаемая оболочка;

e — защита вида «e»;

ia — искробезопасность, уровеиь «ia» (категория «ia»);

ib — искробезопасность, уровень «ib» (категория «ib»);

ic — искробезопасность, уровень «ic» (категория «ic»);

m — герметизация компаундом;

n — защита вида «n»;

s — специальный вид взрывозащиты;

Е. Обозначение группы электрооборудования:

I — для электрооборудования, предназначенного для подземных выработок шахт и рудников и их наземных строений, опасных по рудничному газу или пыли;

II или II A, или II B, или II C — для электрооборудования внутренней и наружной установки предназначенного для применения в местах с потенциально взрывоопасной газовой средой, кроме шахт и их наземных строений, опасных по рудничному газу.

Буквы A, B, C должны использоваться в том случае, если это предписывает стандарт на взрывозащиту конкретного вида.

Если электрооборудование предназначено для применения только в одном газе, сразу за обозначением «II» должна следовать химическая формула (или название) газа.

Примечание. Электрооборудование, имеющее маркировку II B, пригодно для применения в местах, где требуется электрооборудование группы II A. Подобным же образом электрооборудование с маркировкой II C пригодно для применения в местах, где требуется электрооборудование группы II A или II B.

F. Для электрооборудования группы II — обозначение температурного класса, или максимальную температуру поверхности, или же то и другое вместе. Если в маркировке указаны оба этих данных, температурный класс должен указываться последним, в скобках. На кабельных вводах температурный класс не маркируют.

Пример: T1 или 350 °C, или 350 °C (T1).

Электрооборудование, имеющее максимальную температуру поверхности выше 450 °C, должно маркироваться лишь нанесением значения температуры.

Пример: 600 °C.

Электрооборудование, предназначенное для применения в определенном газе, не требует указания значения температуры.

G. Порядковый номер, за исключением:

— присоединительной арматуры (кабельные и трубные вводы, заглушки, промежуточные платы, розетки и вилки соединителей и проходные изоляторы);

— миниатюрного оборудования с ограниченной поверхностью.

(Номер партии может рассматриваться в качестве альтернативы порядковому номеру).

Н. Название или знак органа по сертификации и номер сертификата (при выдаче сертификата).

I. Специальные условия для обеспечения безопасности в эксплуатации, если испытательная организация считает необходимым это указать, после маркировки взрывозащиты должен размещаться знак X. Испытательная организация может использовать предупредительную надпись вместо знака X.

Примечание. Изготовитель должен обеспечивать передачу потребителю требований по специальным условиям безопасного применения вместе с другой необходимой информацией.

J. Любую другую дополнительную маркировку, предписываемую стандартами на взрывозащиту конкретных видов, перечисленных в ГОСТ Р 51330.0-99.

К. Любую маркировку, требуемую стандартами на электрооборудование конкретного вида. Указанная маркировка не требует проверки испытательной организацией.

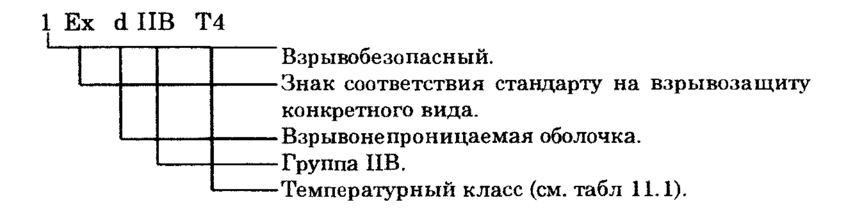
В случае использования на различных частях электрооборудования различных видов взрывозащиты, каждая соответствующая часть должна иметь обозначение принятого в ней вида взрывозащиты.

Если в электрооборудовании используют взрывозащиту нескольких видов, на первом месте ставят обозначение основного вида взрывозащиты, а затем других видов.

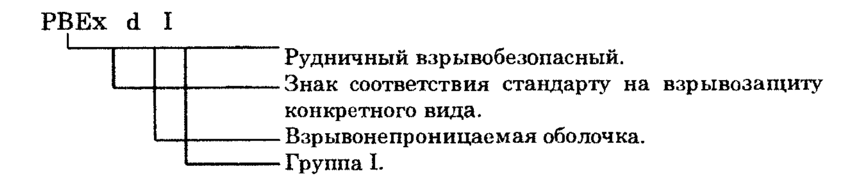
Маркировки по перечислениям C — F должны размещаться в приведенной последовательности.

Примеры маркировки:

1. Асинхронный двигатель АИММ200S4У3 с маркировкой взрывозащиты 1ExdIIBT4.



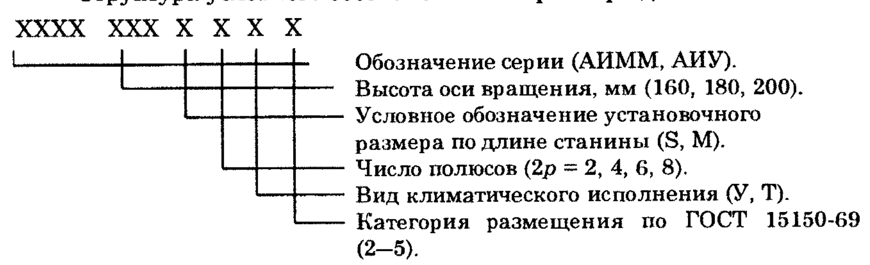
2. Асинхронный двигатель АИУ200М4У5 с маркировкой взрывозащиты РВ Ex dI.



Двигатели АИММ в соответствии с маркировкой взрывозащиты могут применяться во взрывоопасных зонах помещений и наружных установок всех классов согласно главе 7.3 «Правил устройства электроустановок» (ПУЭ) — для России и «Правил устройства электроустановок. Электрооборудование специальных установок» (ДНАОП 0.00-1.32-01) — для Украины и других нормативных документов, регламентирующих применение во взрывоопасных зонах.

Двигатели АИУ могут применяться в подземных выработках угольных и сланцевых шахт, а также в помещениях и наружных установках, опасных по метану и угольной пыли согласно ГОСТ 12.1.011-78 и «Правил безопасности в угольных шахтах» (ДНАОП 1.1.30-1.01) — для Украины и ГОСТ Р 51330.19-99 — для России.

Структура условного обозначения типоразмера двигателей:



Двигатели предназначены для продолжительного режима работы (S1 по ГОСТ 183-74) в районах с умеренным (исполнение У) и тропическим (исполнение Т) климатом по ГОСТ 15150-69 категорий размещения 2—5, на высоте до 1000 м над уровнем моря.

Двигатели могут эксплуатироваться также на высоте от 1000 м до 4300 м, при этом технические характеристики должны быть изменены по ГОСТ 183-74.

Степень защиты двигателей от внешних воздействий IP54.

При эксплуатации двигателей в режимах S2, S3, S4 допустимые значения мощности или тока и частоту включений в час необходимо определять согласно общим законам электропривода (см. ОСТ 16.0.510.062-85).

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЗАЩИТЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

1. Какие размеры асинхронного двигателя называются главными? Почему именно эти размеры получили названия главных?
2. Какие физические величины относятся к электромагнитным нагрузкам асинхронного двигателя?
3. Как рассчитывается и что характеризует критерий правильности выбора главных размеров λ? Какие преимущества и недостатки имеют двигатели с λ_{min} перед двигателями с λ_{max}?
4. Перечислите требования, предъявляемые к трёхфазным обмоткам.
5. С какой целью обмотку статора выполняют с укороченным шагом и распределённой? Как рассчитывается обмоточный коэффициент?
6. Перечислите преимущества и недостатки однослойных обмоток в сравнении с двухслойными.
7. Какая часть обмотки наэывается катушечной группой? Как рассчитывается количество катушек в катушечной группе?
8. По каким условиям выбирается число параллельных ветвей фазы однослойной и двухслойной обмоток?
9. На какой угол смещены относительно друг друга начала фаз обмотки статора? Как этот угол рассчитать в пазах?
10. На какие углы смещены катушечные группы фазы относительно друг друга в однослойной и двухслойной обмотках? Как рассчитать эти углы?
11. Как рассчитывается относительный шаг обмотки? Чему он равен в однослойной обмотке и в каких пределах лежит в двухслойной обмотке при $2p=2$ и $2p=4$?
12. Какие технологические ограничения вводятся на параметры обмоточного провода? В каких случаях эффективный проводник разбивают на несколько элементарных? Как это делают?
13. Укажите численные значения коэффициента заполнения паза статора обмоточным проводом для двигателей с $2p=2$ и $2p>2$. Почему нельзя превышать верхние пределы указанных значений? Что

произойдёт, если коэффициент заполнения будет меньше указанных значений?

14. Приведите характеристику ротора разрабатываемого двигателя (обмотка, сердечник, пазы, зубцы, посадка на вал).
15. Почему при расчёте размеров зубцовых зон статора и ротора индукция в зубцах не должна превышать 2,1 Тл?
16. Приведите максимально допустимые значения плотности тока в стержне обмотки ротора при степенях защиты IP44 и IP23.
17. Дайте характеристику короткозамкнутой обмотки ротора (число фаз, число витков в фазе, обмоточный коэффициент, фазный ток).
18. Какое уравнение используется для расчёта магнитной цепи асинхронного двигателя? На какие участки разбивается магнитная цепь при расчёте?
19. При каком значении индукции в зубцах статора и ротора возникает необходимость учёта ответвления магнитного потока в паз? Какой метод расчёта при этом используется? В чём его суть?
20. Как рассчитывается коэффициент насыщения зубцовой зоны? Что он характериэует (k_z>1,6 и k_z<1,2)?
21. Как рассчитывается коэффициент насыщения магнитной цепи двигателя? Что он характеризует (k_μ >1,5 и k_μ <1,2)?
22. Запишите относительные значения токов холостого хода в двигателях с числом полюсов: $2p$=2; $2p$=4; $2p$=6; $2p$=8.
23. Что подразумевают под понятием «параметры асинхронного двигателя»? Начертите Т-образную схему замещения асинхронного двигателя и перечислите все параметры двигателя.
24. На какие составляющие подразделяется реальный магнитный поток при расчёте асинхронного двигателя?
25. Перечислите составляющие магнитных потоков рассеяния обмоток статора и ротора. Объясните, по каким контурам они замыкаются.
26. Объясните, что понимают под понятием «коэффициент магнитной проводимости».

27. Какие коэффициенты магнитной проводимости рассчитываются при определении индуктивных сопротивлений рассеяния фаз статора и ротора?
28. Запишите, в каких пределах лежат значения параметров асинхронного двигателя в относительных единицах.
29. Перечислите виды потерь в асинхронном двигателе, которые относятся к основным.
30. При какой конструкции двигателя возникают поверхностные и пульсационные потери?
31. Почему основные магнитные потери учитываются только в магнитопроводе статора?
32. Какие характеристики асинхронного двигателя называются рабочими?
33. Какие параметры Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя изменяются при изменении частоты сети?
34. Какие характеристики асинхронного двигателя называются пусковыми?
35. Объясните, каким образом эффект вытеснения тока в короткозамкнутом роторе влияет на величину пускового момента. Почему этот эффект увеличивается с ростом отношения высоты паза к его ширине? Почему вытеснение тока в обмотке ротора исчезает в рабочем режиме?
36. Как влияет насыщение коронок зубцов статора и ротора в пусковом режиме на магнитные потоки рассеяния? Каким образом это влияние учитывают при расчёте пусковых характеристик?
37. Начертите схему движения охлаждающего воздуха и дайте характеристику способу охлаждения IC0141.
38. Начертите радиальную схему охлаждения и дайте её характеристику (способ охлаждения IC01).
39. Перечислите основные конструктивные узлы асинхронного двигателя общего назначения:
    - степень защиты IP44;
    - степень защиты IP23.

40. Расскажите о конструкции станины двигателя общего назначения:
   - со степенью защиты IP44;
   - со степенью защиты IP23.
41. На сколько групп подразделяется взрывозащищённое электрооборудование? Дайте характеристику групп.
42. Расскажите, как выполняется вид взрывозащиты «взрывонепроницаемая оболочка-d».
43. Расшифруйте маркировку взрывозащиты PBExdI.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров К. К., Кузмина Е. Г. Электротехнические чертежи и схемы. 2-е изд. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 300 с.

2. *Асинхронные двигатели серии 4А*: справочник / Э. А. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.

3. Взрывозащищенные асинхронные двигатели (конструкция, проектирование, эксплуатация) / под. ред. В. А. Яковенко. М.: Энергия, 1977. 311 с.

4. *Полузадов В. Н.* Электрические машины: конспект лекций. Часть 2. Общие вопросы теории электромеханического преобразования энергии в электрических машинах. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2004. 63 с.

5. *Полузадов В. Н.* Электрические машины: конспект лекций. Часть 3. Асинхронные машины. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. 86 с.

6. *Проектирование электрических машин*: учеб. для вуэов / И. П. Копылов, Ф. И. Горяинов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев; под ред. И. П. Копылова. 4-е изд. М.: Высшая школа, 2005. 767 с.

7. *Справочник по электрическим машинам*: в 2 т. // под ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. М.: Энергоатомиздат, 1988.

8. Гольдберг О. Д. и др. Проектирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2001.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Расчет и конструирование трехфазных однослойных обмоток

Для того чтобы лучше понять принцип конструирования трехфазных однослойных обмоток, проведем анализ простейшей однослойной обмотки с числом пазов $Z_1 = 24$ паз., числом полюсов $2p = 4$, числом фаз $m_1 = 3$, катушечные группы которой в каждой фазе соединены последовательно (число параллельных ветвей $a = 1$). Схема распределения пазов по фазам такой обмотки показана на рис. П.1.

Все пазы обмотки разделены на четыре равные части по числу полюсных делений (количество полюсных делений всегда равно числу полюсов, в нашем случае $2p = 4$). На каждом полюсном делении иаходится по 6 пазов ($\tau = Z_1 / 2p = 24 / 4 = 6$ паз.). Число пазов на полюс н фазу (число катушек в одной катушечной группе) $q = Z_1 / (2\,p\,m_1) = 24 / (4 \cdot 3) = 2$.

Следовательно, каждая фаза на каждом полюсном делении занимает по два паза, причем чередование фаз на каждом полюсном делении при размещении трехфазной обмотки по пазам всегда соответствует порядку *A, C, B* (см. рис. П.1).

Для образования вращающегося магнитного поля направления мгновенных значений токов в пределах одного полюсного деления должны быть одинаковыми, а в пазах соседних полюсных делений направление мгновенных значений токов должно меняться на противоположное (см. рис. П.1). Обычно на схему наносят направления мгновенных значений токов для момента времени $\omega_1 t_1 = \pi/2$, когда направления токов в фазах *B* и *C* противоположны направленню тока в фазе *A*.

Рис. П.1 является схемой активной (пазовой) части однослойной обмотки. Лобовые соединения должны быть выполнены так, чтобы обеспечивалось нужное направление мгновенных значений токов на каждом полюсном делении. Следовательно, тип однослойной обмотки обусловливается схемой лобовых соединений.

В настоящее время нашли применение однослойные концентрические, шаблонные и цепные обмотки. В современных электрнческих машинах широкое распространение получили однослойные концентрические обмотки.

Поэтому расчет и конструирование однослойной обмоткн рассмотрим на примере однослойной концентрической обмотки со следующими данными: число фаз $m_1 = 3$ число полюсов $2p = 4$, число пазов статора $Z_1 = 24$ паз.

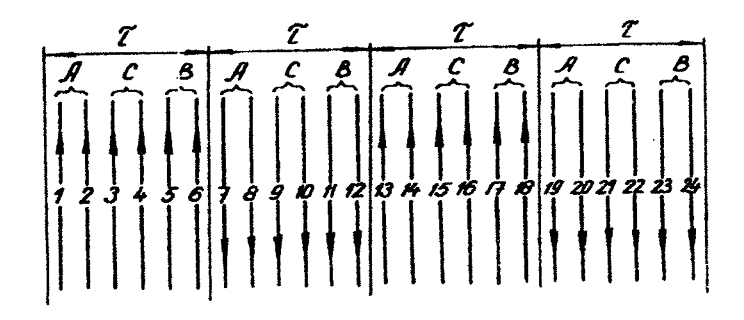


Рис. П.1. Схема распределения пазов по фазам однослойной обмотки

Расчет

1. Количество катушек, из которых собирается трехфазная однослойная обмотка

$$K = 0{,}5Z_1 = 0{,}5 \cdot 24 = 12 \text{ кат.}$$

2. Количество катушек в фазе

$$K_ф = K / m_1 = 12/3 = 4 \text{ кат.}$$

3. Полюсное деление в пазах

$$\tau_п = Z_1 / 2p = 24/4 = 6 \text{ паз.}$$

4. Число пазов на полюс и фазу (число катушек в одной катушечной группе)

$$q = Z_1 / (2p \cdot m_1) = 24/(4 \cdot 3) = 2.$$

5. Количество катушечных групп в фазе

$$КГ_ф = К_ф / q = 4/2 = 2.$$

В однослойных обмотках количество катушечных групп в фазе всегда равно числу пар полюсов ($КГ_ф = p$).

6. Наружный шаг обмотки

$$y_{нар} = 4q - 1 = 4 \cdot 2 - 1 = 7 \text{ паз.}$$

7. Внутренний шаг обмотки

$$y_{вн} = 2q + 1 = 2 \cdot 2 + 1 = 5 \text{ паз.}$$

8. Смещение катушечных групп фазы относительно друг друга

$$C_{гр} = 2\tau_п = 2 \cdot 6 = 12 \text{ паз.}$$

9. Смещение начал фаз относительно друг друга

$$C_ф = \frac{2}{3}\tau_п = \frac{2}{3} \cdot 6 = 4 \text{ паз.}$$

В связи с тем, что полюсное деление всегда равно 180° эл., а начала фаз смещены относительно друг друга на 120° эл., они смещены в пазах на $\frac{2}{3}\tau_п$.

10. Возможные варианты соединения катушечных групп фазы.

Количество параллельных ветвей однослойной фазной обмотки можно выбрать только при соблюдении условия $КГ_ф/a = p/a$ = целое число, так как во всех параллельных ветвях должно быть одинаковое число катушечных групп. Поэтому в данном случае фазная обмотка может быть выполнена с одной параллельной ветвью ($a = 1$) или с двумя параллельными ветвями ($a = 2$).

После расчета составляется схема-таблица укладки катушек обмотки в пазы (табл. П.1) и чертится схема обмотки (рис. П.2).

При правильном составлении таблицы каждый номер паза должен присутствовать в ней только один раз.

Однослойные концентрические обмотки характерны тем, что катушки, образующие катушечную группу, являются концентрическими, т. е. охватывают одна другую. Поэтому размеры катушек в катушечной группе различны. Кроме этого, различна длиив катушек, принадлежащих соседним ка-

тушечным группам — «малым» и «большим». Лобовые части катушек обычно располагаются в двух разных плоскостях (рис. П.3).

Таблица П.1

Схема-таблица укладки в пазы катушек однослойной концентрической обмотки

Фаза *A*	Фаза *B*	Фаза *C*
$КГ_ф = p\begin{cases} q\begin{cases} 1+y_{нар}8 \\ 2+y_{вн}7 \end{cases} \\ +2\tau_п \\ q\begin{cases} 13+y_{нар}20 \\ 14+y_{вн}19 \end{cases} \end{cases}$ $+C_ф$	$\begin{cases} q\begin{cases} 5+y_{нар}12 \\ 6+y_{вн}11 \end{cases} \\ +2\tau_п \\ q\begin{cases} 17+y_{нар}24 \\ 18+y_{вн}23 \end{cases} \end{cases}$ $+C_ф$	$\begin{cases} q\begin{cases} 9+y_{нар}16 \\ 10+y_{вн}15 \end{cases} \\ +2\tau_п \\ q\begin{cases} 21+y_{нар}4 \\ 22+y_{вн}3 \end{cases} \end{cases}$

Катушки, образующие катушечную группу, всегда соединяются между собой последовательно согласно.

При смещении катушечных групп фазы на расстояние 2τ (360° эл.) катушечные группы соединяют между собой таким образом, чтобы направление токов в них было одиаковым.

Дальнейший анализ однослойной обмотки проведем, используя условные схемы. На рис. П.4 показаны условные схемы фазы *A* с одной и двумя параллельными ветвями.

Катушечные группы в фазах *B* и *C* соединяются аналогично. В условной схеме катушечная группа обозначается прямоугольником, в котором над косой чертой ставится номер катушечной группы, а под косой чертой — количество катушек, образующих катушечную группу (q).

Условные схемы ясно покаэывают специфику соединений катушечных групп в фазе обмотки, практически формирующих нужную полярность при заданном числе параллельных ветвей, и позволяют рассматривать не отдельные схемы обмоток с различными значениями z и q, а представлять их в виде типовых схем для любых значений z при определенной полюсиости.

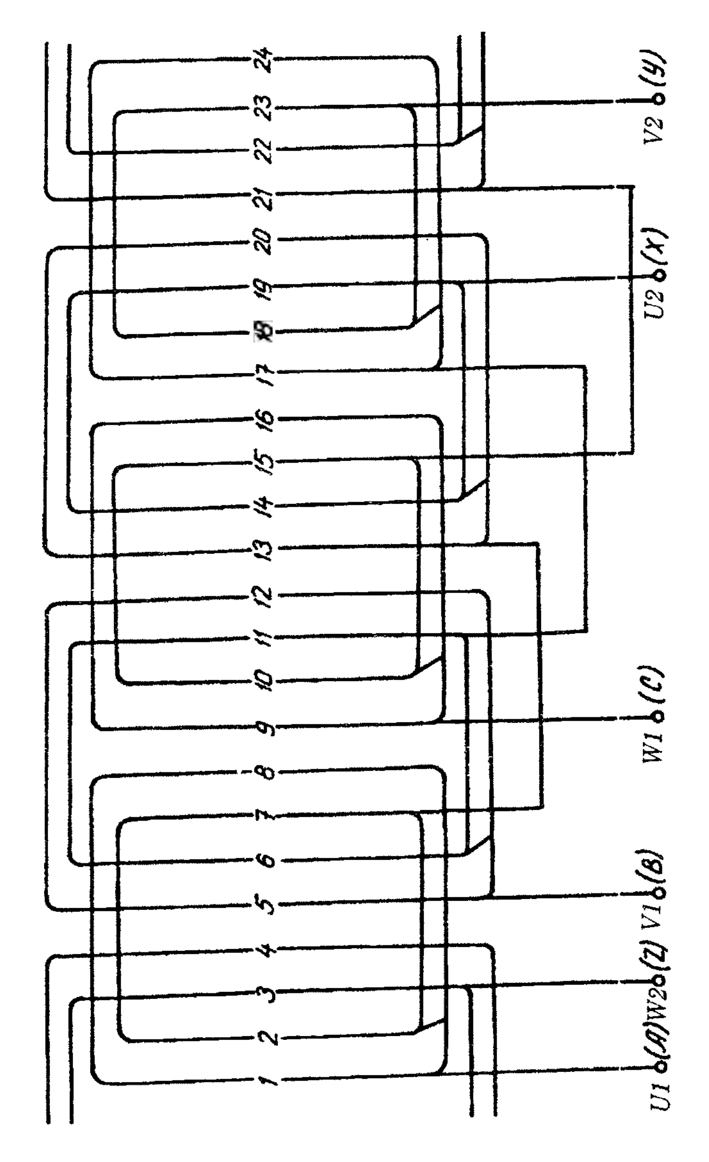


Рис. П.2. Схема однослойной концентрической обмотки:
Z_1=24 паз.; $2p = 4$; $m_1 = 3$; $a = 1$

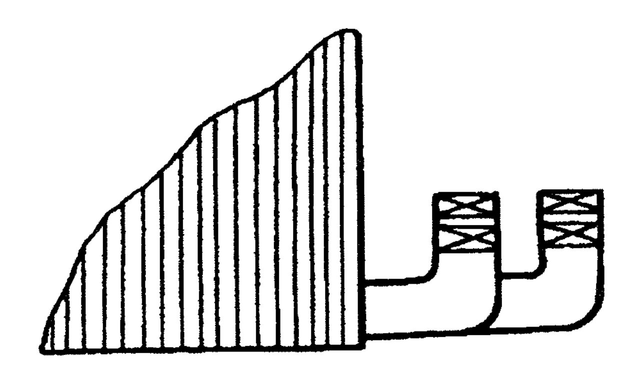


Рис. П.3. Расположение лобовых частей катушек однослойной концентрической обмотки

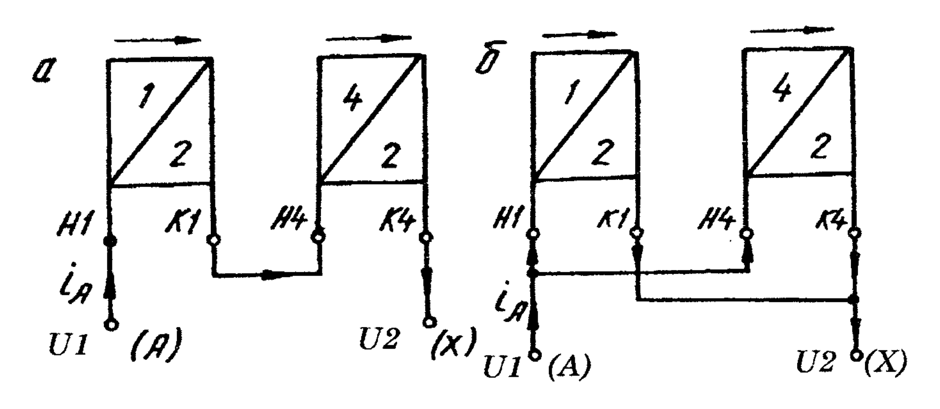


Рис. П.4. Условная схема фазы *A* однослойной концентрической обмотки с $Z_1 = 24$, $2p = 4$, $m_1 = 3$:

а — $a = 1$; *б* — $a = 2$

Расчет и конструирование трехфазных двухслойных обмоток

Двухслойные обмотки могут быть катушечными или стержневыми. Катушечные двухслойные обмотки применяются в статорах большинства машин переменного тока мощностью более 10—15 кВт, а стержневые — в статорах машин большой мощности (турбо- и гидрогенераторах) и в фазных роторах асинхронных двигателей.

Основным достоинством двухслойных обмоток является возможность использовать укорочение шага для подавления высших гармоник в кривой ЭДС.

Рассмотрим принцип построения схемы двухслойной катушечной обмотки статора трехфазной машины с Z_1=24, $2p = 4$, $m_1 = 3$, $a = 1$, т. е. с теми же данными, что и у однослойной обмотки.

В каждом пазу двухслойной обмотки размещаются две стороны разных катушек, поэтому на рис. П.5 показаны 24 пары линий пазов. Сплошная линия каждой пары обозначает сторону катушки, лежащую в верхней части паза, а пунктирная — сторону катушки, лежащую в нижней части паза (на дне). Разделим пазы по числу полюсов на четыре полюсных деления по шесть пазов в каждом и в пределах полюсных делений разместим фазы. Каждая фаза на полюсном делении занимает два паза. Стрелками на сплошных линиях, соответствующих верхним сторонам катушек, покажем направления мгновенных значений токов в них. Они одинаковы во всех фазах в пределах одного полюсного деления и меняются на обратные при переходе к соседнему полюсному делению.

Направление тока в нижних сторонах катушек не показывают, так как оно зависит от укорочения шага и при составлении схемы роли не играет.

Следовательно, общие принципы конструирования, такие, как порядок чередования фаз и направлеиие мгновенных значений токов в пределах полюсного деления и изменение направления тока на обратное при переходе к соседнему полюсному делению, остаются одинаковыми для однослойных и двухслойных обмоток.

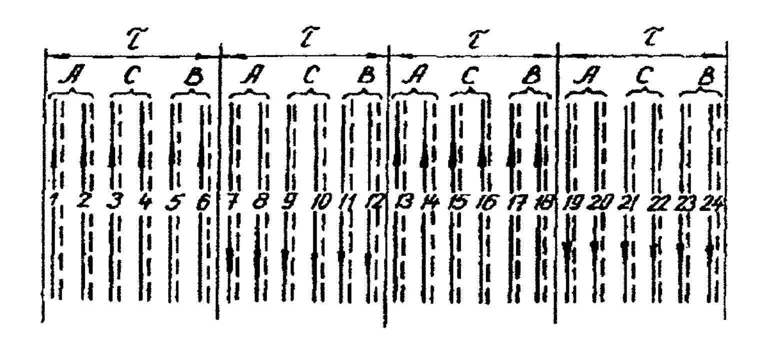


Рис. П.5. Схема распределения пазов по фазам двухслойной обмотки

Расчет

1. Количество катушек, из которых собнрается трехфазная, двухслойная обмотка,

$$K = Z_1 = 24 \text{ кат.}$$

2. Количество катушек в фазе

$$K_{Ф} = K / m_1 = 24/3 = 8 \text{ кат.}$$

3. Полюсное деленне в пазах

$$\tau_{п} = Z_1 / 2p = 24/4 = 6 \text{ паз.}$$

4. Число пазов иа полюс и фазу (количество катушек в одной катушечной группе)

$$q = Z_1 /(2p \cdot m_1) = 24/(4 \cdot 3) = 2.$$

5. Количество катушечных групп в фазе

$$КГ_{Ф} = К_{Ф} / q = 8/2 = 4.$$

В двухслойной обмотке количество катушечных групп в фазе всегда равно числу полюсов ($КГ_{ф} = 2p$).

6. Выбор предварительного значения относительного шага обмотки.

Рекомендуется выбирать предварительное значение относительного шага из следующих диапазонов:

$$\beta_{1.пред.} = 0{,}58 - 0{,}63, \text{ если } 2p = 2;$$

$$\beta_{1\,пред.} = 0{,}78 - 0{,}83, \text{ если } 2p > 2.$$

Принимаем $\beta_{1\,пред} = 0{,}8$, так как $2p = 4$.

7. Предварительное значение шага обмотки

$$y_{пред} = \beta_{1\,пред1.} \cdot \tau_п = 0{,}8 \cdot 6 = 4{,}8 \text{ паз.}$$

8. Выбор шага обмотки.

Шаг обмотки в пазах может быть только целым числом, поэтому, чтобы получить значение шага обмотки, надо $y_{пред}$ округлить до ближайшего целого числа

$$y = 5 \text{ паз.}$$

9. Относительный шаг обмотки

$$\beta_1 = y / \tau_п = 5 / 6 = 0{,}83.$$

10. Смещение катушечных групп фазы относительно друг друга

$$C_{гр} = \tau = 6 \text{ паз.}$$

Смещение катушечных групп фазы относительно друг друга на полюсное деление, которое равно 180° эл., позволяет расположить их симметрично во вращающемся магнитном поле.

11. Смещение начал фаз относительно друг друга

$$C_Ф = \frac{2}{3}\tau_п = \frac{2}{3} \cdot 6 = 4 \text{ паз.}$$

Смещение начал фаз на $\frac{2}{3}\tau$ соответствует их сдвигу в пространстве на 120° эл.

12. Возможные варианты соединения катушечных групп фазы.

Варианты соединения катушечных групп в фазную обмотку выбираются исходя из условия, что во всех параллельных ветвях должно быть одина

ковое число катушечных групп ($КГ_ф/a = 2p/a$ = целое число). Возможные варианты параллельных ветвей для нашего случая: $a = 1, 2, 4$.

После расчета составляется схема-таблица укладки катушек в пазы (табл. П.2) и чертится схема обмотки (рис. П.6).

При правильном составлении таблицы каждый номер паза должен присутствовать в таблице один раз без штриха и один раз со штрихом.

Катушки, образующие катушечную группу, всегда соединяются между собой последовательно согласно.

При смещении катушечных групп фазы относительно друг друга на (180° эл) катушечные группы между собой соединяются таким образом, чтобы направление тока в соседних катушечных группах было противоположным.

Дальнейший анализ двухслойной обмотки проведем, используя условные схемы.

На рис. П.7 показаны условные схемы фазы *A* двухслойной обмотки с различными числами параллельных ветвей. Катушечные группы в фазах *B* и *C* соединяются аналогично.

Необходимо знать стандартную маркировку начал и концов фазных обмоток статора и ротора.

Для машин, разработанных после 01.01.1987 г., принята система обозначений выводов, соответствующая международным стандартам:

а) трехфазная обмотка статора

$$A - X \Rightarrow U1 - U2;\ \ B - Y \Rightarrow V1 - V2;\ \ C - Z \Rightarrow W1 - W2;$$

б) трехфазная обмотка ротора:

$$K1 - K2;\ L1 - L2;\ M1 - M2.$$

При соединении фазных обмоток статора в звезду выводы маркируются *U, V, W, N* (нейтральная точка) в треугольник *U, V, W*, а выводы обмотки ротора при соединении в звезду и треугольник — *K, L, M*.

В машинах малой мощности и микромашинах применяется цветовое обозиачение выводов фазных обмоток: $A - X \Rightarrow$ желтый — желтый с черным; $B - Y \Rightarrow$ зеленый — зеленый с черным; $C - Z \Rightarrow$ красный — красный с черным; *N* — черный. При соединении фазных обмоток в звезду и треугольник выводы маркируются следующим образом: *A* — желтый, *B* — зеленый, *C* — красный.

Таблица П.2

Схема-таблица укладки в пазы катушек двухслойной обмотки с укороченным шагом и целым числом пазов на полюс и фазу

Фаза A		Фаза B		Фаза C	
верх	низ	верх	низ	верх	низ
$КГ_Ф = 2p$ { q { $1+\ y\ \ 6'$; $2+\ y\ \ 7'$ } $+\ \tau_п$ q { $7+\ y\ \ 12'$; $8+\ y\ \ 13'$ } $+\ \tau_п$ q { $13+\ y\ \ 18'$; $14+\ y\ \ 19'$ } $+\ \tau_п$ q { $19+\ y\ \ 24'$; $20+\ y\ \ 1'$ } }	$+C_Ф$	q { $5+\ y\ \ 10'$; $6+\ y\ \ 11'$ } $+\ \tau_п$ q { $11+\ y\ \ 16'$; $12+\ y\ \ 17'$ } $+\ \tau_п$ q { $17+\ y\ \ 22'$; $18+\ y\ \ 23'$ } $+\ \tau_п$ q { $23+\ y\ \ 4'$; $24+\ y\ \ 5'$ }	$+C_Ф$	q { $9+\ y\ \ 14'$; $10+\ y\ \ 15'$ } $+\ \tau_п$ q { $15+\ y\ \ 20'$; $16+\ y\ \ 21'$ } $+\ \tau_п$ q { $21+\ y\ \ 2'$; $22+\ y\ \ 3'$ } $+\ \tau_п$ q { $3+\ y\ \ 8'$; $4+\ y\ \ 9'$ }	

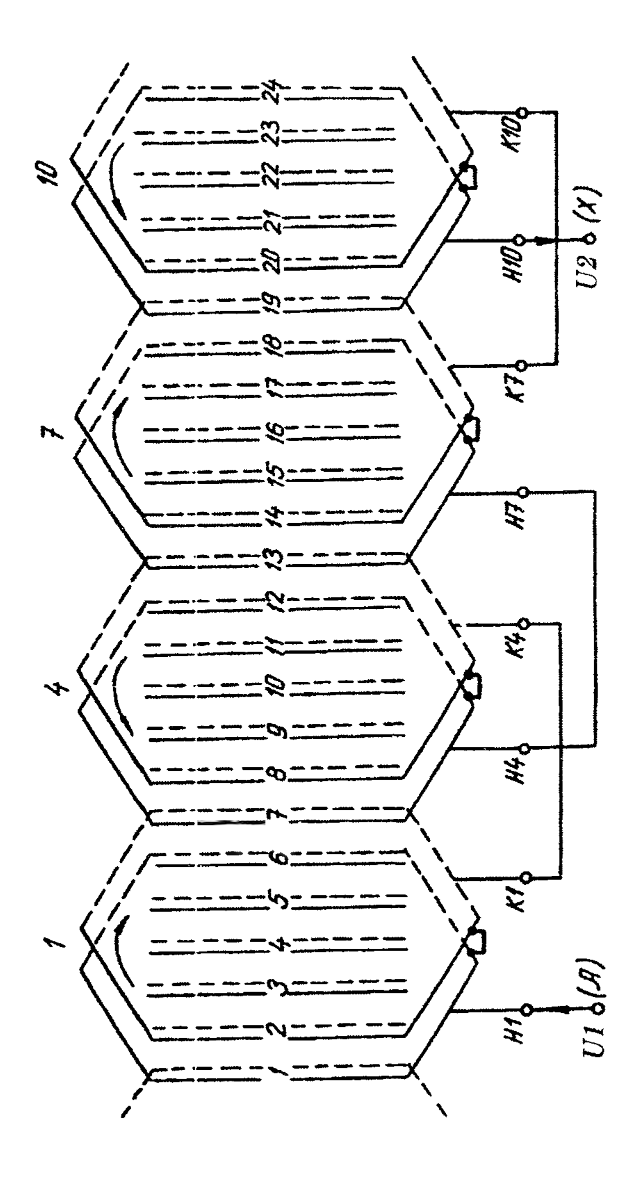


Рис. П.6. Схема двухслойной обмотки с укороченным шагом и целым числом пазов на полюс и фазу (фаза А)

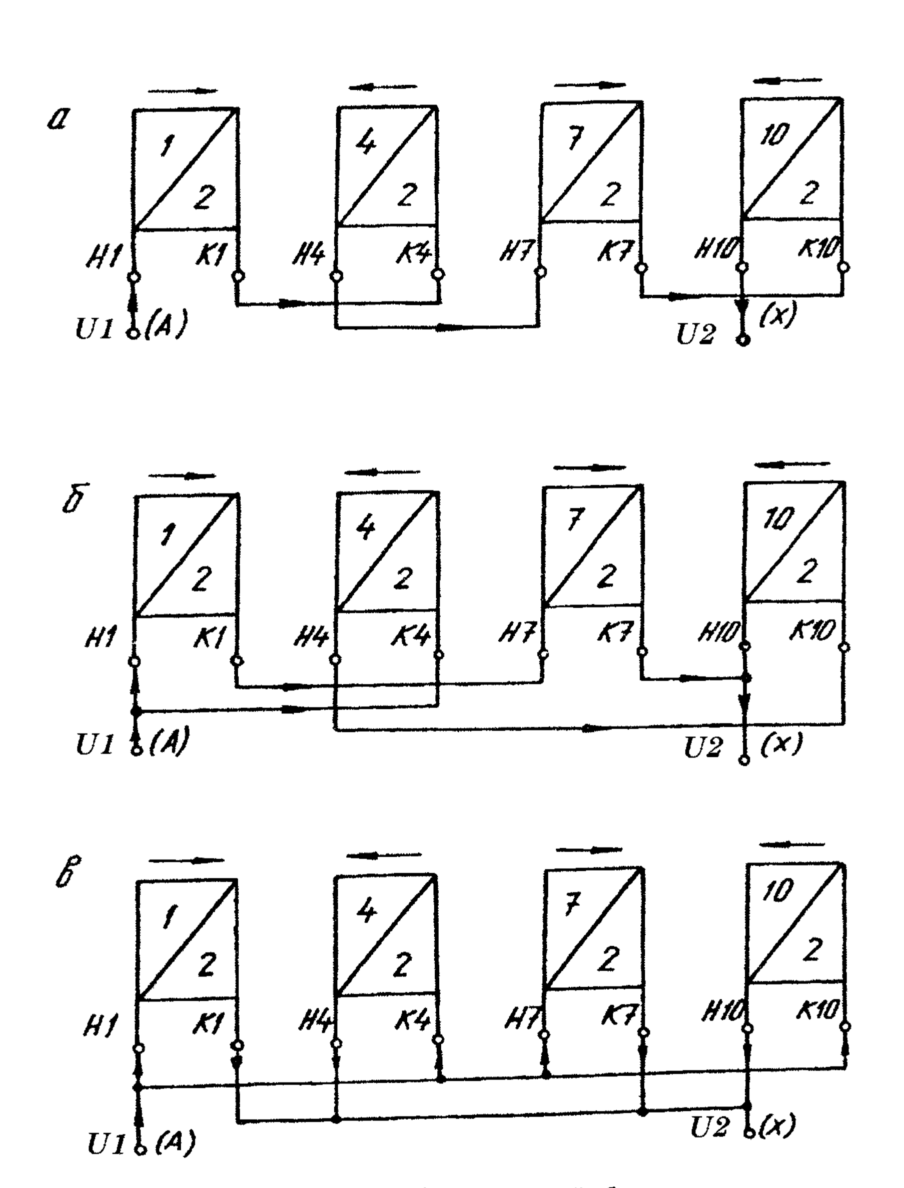


Рис. П.7. Условная схема фазы А двухслойной обмотки с укороченным шагом и целым числом пазов на полюс и фазу с $Z_1 = 24$, $2p = 4$, $m_1 = 3$: *а* — $a = 1$; *б* — $a = 2$; *в* — $a = 4$

Диаметры и площади поперечного сечения круглых медных проводов

а) Провода марки ПЭТ-155, класс нагревостойкости эмалевой изоляции F.

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2	Диаметр изолированного провода марки ПЭТ-155, мм	Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2	Диаметр изолированного провода марки ПЭТ-155, мм
0,06	0,00283	0,080	0,67	0,3530	0,730
0,07	0,00385	0,090	0,69	0,3740	0,750
0,08	0,00503	0,100	0,72	0,4070	0,780
0,09	0,00636	0,110	0,74	0,4300	0,805
0,10	0,00785	0,122	0,77	0,4660	0,835
0,11	0,00950	0,132	0,80	0,5030	0,865
0,12	0,01131	0,142	0,83	0,5410	0,895
0,13	0,01327	0,152	0,86	0,5810	0,925
0,14	0,01539	0,162	0,90	0,6360	0,965
0,15	0,01767	0,180	0,93	0,6790	0,995
0,16	0,0201	0,190	0,96	0,7240	1,025
0,17	0,0227	0,200	1,00	0,785	1,080
0,18	0,0255	0,210	1,04	0,849	1,120
0,19	0,0284	0,220	1,08	0,916	1,160
0,20	0,0314	0,230	1,12	0,985	1,200
0,21	0,0346	0,240	1,16	1,057	1,240
0,23	0,0415	0,265	1,20	1,131	1,280
0,25	0,0491	0,285	1,25	1,227	1,330
0,27	0,0573	0,305	1,30	1,327	1,385
0,29	0,0661	0,325	1,35	1,431	1,435
0,31	0,0755	0,345	1,40	1,539	1,485
0,33	0,0855	0,365	1,45	1,651	1,535
0,35	0,0962	0,390	1,50	1,767	1,585

0,38	0,1134	0,420	1,56	1,911	1,645
0,41	0,1320	0,450	1,62	2,060	1,705
0,44	0,1521	0,480	1,68	2,220	1,765
0,47	0,1735	0,510	1,74	2,380	1,825
0,49	0,1886	0,530	1,81	2,570	1,905
0,51	0,2040	0,565	1,88	2,780	1,975
0,53	0,2210	0,585	1,95	2,990	2,045
0,55	0,2380	0,605	2,02	3,200	2,115
0,57	0,2550	0,625	2,10	3,460	2,200
0,59	0,2730	0,645	2,26	4,010	2,360
0,62	0,3020	0,675	2,44	4,680	2,540
0,64	0,3220	0,700	2,63	5,430	—

б) Провода марки ПЭТ-200, класс нагревостойкости эмалевой изоляции Н

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2	Диметр изолированного провода марки ПЭТ-200, мм	Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2	Диметр изолированного провода марки ПЭТ-200, мм
0,50	0,196	0,552	1,25	1,227	1,325
0,56	0,246	0,612	1,32	1,368	1,395
0,63	0,312	0,690	1,40	1,539	1,485
0,71	0,396	0,770	1,50	1,767	1,585
0,75	0,442	0,810	1,60	2,011	1,685
0,80	0,503	0,865	1,70	2,270	1,785
0,85	0,567	0,915	1,80	2,545	1,895
0,90	0,636	0,965	1,90	2,835	1,995
0,95	0,709	1,015	2,00	3,142	2,095
1,00	0,785	1,080	2,12	3,530	2,215
1,06	0,882	1,135	2,24	3,941	2,345
1,12	0,985	1,195	2,36	4,374	2,465
1,18	1,094	1,255	2,50	4,909	2,605

Подшипники качения

Шарикоподшипники радиальные однорядные (ГОСТ 8338)

Легкая серия

Условное обозначение подшипника	*d*, мм	*D*, мм	*B*, мм	*r*, мм	*C*, Н	C_o, Н	*n*, об/мин
200	10	30	9	1,0	4600	2610	20000
201	12	32	10	1,0	4700	2650	20000
202	15	35	11	1,0	5850	3470	16000
203	17	40	12	1,0	7400	4400	16000
204	20	47	14	1,5	9800	6200	12500
205	25	52	15	1,5	10800	6950	10000
206	30	62	16	1,5	15000	10000	10000
207	35	72	17	2,0	19700	13600	8000
208	40	80	18	2,0	25100	17800	6300
209	45	85	19	2,0	25200	17800	6300
210	50	90	20	2,0	27000	19800	6300
211	55	100	21	2,5	33400	25100	5000
212	60	110	22	2,5	40400	30900	5000
213	65	120	23	2,5	44000	34000	5000
214	70	125	24	2,5	48000	37400	4000
215	75	130	25	2,5	51000	41000	4000
216	80	140	26	3,0	56000	44500	4000
217	85	150	28	3,0	64000	53100	4000
218	90	160	30	3,0	74000	66500	3150
219	95	170	32	3,5	84000	69500	3150
220	100	180	34	3,5	94000	79000	3150

Средняя серия

300	10	35	11	1,0	6250	3750	20000
301	12	37	12	1,5	7500	4640	16000
302	15	42	13	1,5	8750	5400	16000
303	17	47	14	1,5	10700	6670	12500
304	20	50	15	2,0	12250	7780	12500
305	25	62	17	2,0	17250	11400	10000
306	30	72	19	2,0	21600	14800	8000
307	35	80	21	2,5	25700	17550	8000
308	40	90	23	2,5	31300	22200	6300
309	45	100	25	2,5	37000	26200	6300
310	50	110	27	3,0	47500	35600	5000
311	55	120	29	3,0	55000	41800	5000
312	60	130	31	3,5	63000	48400	4000
313	65	140	33	3,5	71300	55600	4000
314	70	150	35	3,5	80200	63200	4000
315	75	160	37	3,5	87500	71500	3150
316	80	170	39	3,5	94200	80200	3150
317	85	180	41	4,0	102000	89400	3150
318	90	190	43	4,0	110000	99000	3150
319	95	200	45	4,0	117600	109000	2500
320	100	215	47	4,0	134000	130000	2500
321	105	225	49	4,0	141000	142000	2500
322	110	240	50	4,0	158000	167000	2500
324	120	260	55	4,0	167000	180000	2000
326	130	280	58	5,0	176500	194000	1600

Роликоподшипники радиальные с короткими цилиндрическими роликами (ГОСТ 8328)

Легкая узкая серия

2202	15	35	11	1,0	5520	3020	16000
2204	20	47	14	1,5	11700	7250	12500
2205	25	52	15	1,5	13200	8450	10000
2206	30	62	16	1,5	17000	11200	10000
2207	35	72	17	2,0	25000	17200	8000
2208	40	80	18	2,0	33000	23500	8000
2209	45	85	19	2,0	34300	25200	6300
2210	50	90	20	2,0	38000	28600	6300
2211	55	100	21	2,5	43000	32300	6300
2212	60	110	22	2,5	53700	42000	5000
2213	65	120	23	2,5	61000	47600	5000
2214	70	125	24	2,5	67500	47700	4000
2215	75	130	25	2,5	76500	60000	4000
2216	80	140	26	3,0	78000	62300	4000
2217	85	150	28	3,0	97000	80900	3150
2218	90	160	30	3,0	119000	99000	3150
2220	100	180	34	3,5	132500	109000	2500

Средняя узкая серия

2305	25	62	17	2,0	22000	14500	8000
2306	30	72	19	2,0	29600	20200	8000
2307	35	80	21	2,5	33400	22800	6300
2308	40	90	23	2,5	40200	28000	6300
2309	45	100	25	2,5	55500	40000	6300
2310	50	110	27	3,0	64000	46500	5000
2311	55	120	29	3,0	82500	61500	5000
2312	60	130	31	3,5	98000	75800	4000
2313	65	140	33	3,5	103000	78800	4000
2314	70	160	35	3,5	121000	95500	4000
2315	75	160	37	3,5	139000	110000	3150
2316	80	170	39	3,5	147000	118500	3150

2317	85	180	41	4,0	175000	143000	3150
2318	90	190	43	4,0	190000	157000	2500
2319	95	200	45	4,0	206000	171500	2500
2320	100	225	47	4,0	238000	197000	2500
2322	110	240	50	4,0	301000	257000	2000
2324	120	260	55	4,0	380000	332000	2000
2326	130	280	58	5,0	424000	374000	2000
2328	140	300	62	5,0	469000	419000	1600
2332	160	340	68	5,0	541000	497000	1600
2336	180	380	75	5,0	764000	724000	1250
2340	200	420	80	6,0	860000	818000	1250

Средняя широкая серия

2605	25	62	24	2,0	36700	27800	8000
2606	30	72	27	2,0	40900	30600	8000
2607	35	80	32	2,5	45800	34200	6300
2608	40	90	33	2,5	59900	46600	6300
2609	45	100	36	2,5	77700	61500	6300
2610	50	110	39	2,5	102000	85500	5000
2611	55	120	43	3,0	113000	92500	5000
2612	60	130	46	3,5	137500	116000	4000
2613	65	140	48	3,5	149000	126500	4000
2615	75	160	55	3,5	208000	183000	3150
2616	80	170	58	3,5	220000	198000	3150
2617	85	180	60	4,0	254000	230000	3150
2618	90	190	64	4,0	265000	240000	2500
2620	100	215	73	4,0	356000	336000	2500
2622	110	240	80	4,0	464000	450000	2000
2624	120	260	86	4,0	548000	532000	2000
2626	130	280	93	5,0	650000	650000	2000
2630	150	320	108	5,0	753000	757000	1600
2634	170	360	120	5,0	1040000	1080000	1250

Подшипники шариковые радиальные однорядные с двусторонним уплотнением (ГОСТ 8882)

Легкая широкая серия

180500	10	30	14	1,0	4590	2670	8000
180501	12	32	14	1,0	4690	2670	8000
180502	15	35	14	1,0	5220	3030	6300
180503	17	40	16	1,0	7360	4410	6300
180504	20	47	18	1,5	8220	5000	5000
180505	25	52	18	1,5	10800	6950	4000
180506	30	62	20	1,5	11600	7740	4000
180508	40	80	23	2,0	23200	17750	3150
180509	45	85	23	2,0	24100	17850	3150

Средняя широкая серия

180602	15	42	17	1,5	8750	5410	8000
180603	17	47	19	1,5	10700	6680	8000
180604	20	52	21	2,0	12250	7800	10000
180605	25	62	24	2,0	17250	11400	7500
180606	30	77	27	2,0	21600	14800	6000
180607	35	80	31	2,5	25700	17550	5500
180608	40	90	33	2,5	30600	22200	4500
180609	45	100	36	2,5	37100	26200	4500
180610	50	110	40	3,0	47600	35600	4100
180611	55	120	43	3,0	54900	41800	4000
180612	60	130	46	3,5	62900	48500	3400

Шарикоподшипники радиально-упорные сдвоенные (ГОСТ 832)

Лёгкая серия

346205	25	52	30	1,5	19700	16700	12500
346206	30	62	32	1,5	25800	22000	10000
346209	45	85	38	2,0	48400	46200	6300
346222	110	200	76	3,5	216500	270000	3150
346234	170	310	104	5,0	380000	600000	2000
346244	220	400	130	5,0	412000	696000	1000

Средняя серия

346308	40	90	46	2,5	59000	55100	6300
346310	50	110	54	3,0	89500	88000	5000
346312	60	130	62	3,5	118500	118600	4000
346313	65	140	66	3,5	140500	150000	4000
346320	100	215	94	4,0	266000	352000	2500
346322	110	240	100	4,0	297000	414000	2000
346330	150	320	130	5,0	445000	740000	1250

Примечание. d — внутренний днаметр; D — наружный диаметр; B — ширина; r — радиус закругления обойм; C — динамическая грузоподъемность; C_0 — статическая грузоподъемность; n — предельная частота вращения подшипника.

Учебное издание

Владимир Николаевич Полузадов
Евгения Алексеевна Дружинина

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПРОЕКТИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ И ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННЫХ ИСПОЛНЕНИЙ

Учебное пособие

Редактор изд-ва *Ж. И. Пионтик*
Корректура, компьютерная верстка *С. Ф. Правдина*
Г. Б. Бучок, И. Н. Шут

Подписано в печать 26.08.2010 г.
Бумага писчая. Формат 60x84 $^{1}/_{16}$. Гарнитура Century Schoolbook.
Печ. л. 23,8. Уч.-изд. л. 19,0. Печать на ризографе.
Тираж 300 экз. Заказ 1070158.

Уральский государственный горный университет
Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Отпечатано с оригинал-макета в ООО «Форт Диалог-Ис т »

